



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA  
BARCELONATECH

Escola Superior d'Agricultura de Barcelona

# **VIABILITAT DELS GEOPOLÍMERS COM A MATRIUS SOSTENIBLES PER A FIBROCIMENTS REFORÇATS AMB FIBRES VEGETALS**

Treball final de grau  
Enginyeria Alimentària

Autora: Cristina Casals Miralles

Tutor: Josep Claramunt Blanes

13 / juliol / 2018

## Resum

Actualment es coneix un nou tipus de canvi climàtic, a banda del provocat naturalment pels gasos de l'atmosfera, que és degut a l'activitat humana. La indústria de la construcció contribueix en gran part a l'emissió de gasos d'efecte hivernacle, en concret  $\text{CO}_2$ . La producció de ciment Portland és de 6 bilions de tones a l'any, i cada tona produïda genera 0.55 tones de  $\text{CO}_2$  químic i 0.39 tones de  $\text{CO}_2$  addicionals provinents del combustible usat en la cocció i el molturat.

Aquests fets han derivat en que la recerca científica hagi augmentat l'interès en els materials de construcció sostenibles amb una baixa petjada de carboni. En aquesta línia es troben branques d'estudi amb la voluntat de substituir el ciment Portland per aluminosilicats activats amb àlcali i les fibres sintètiques per fibres vegetals.

El present estudi té com a objectiu comprovar la viabilitat dels geopolímers com a matriu sostenible per a la producció de fibrociments reforçats amb fibres vegetals.

Per arribar a l'objectiu s'ha buscat la dosificació amb propietats més òptimes de la matriu de geopolímer mitjançant l'assaig de provetes a flexió i a compressió, així com també s'ha fet l'anàlisi de difracció de Raigs X (DRX), espectroscòpia d'infrarojos per transformada de Fourier (FTIR) i termogravimetria (TGA). En segon lloc s'ha estudiat la viabilitat i durabilitat de la polpa Kraft incorporada en la matriu de geopolímer mitjançant la realització de provetes que s'han assajat a flexió i a compressió, s'han sotmès a cicles d'assecat-humitejat, així com també s'han estudiat amb SEM i BSE SEM.

S'ha conclòs que tot i que la matriu de geopolímer amb polpa Kraft és un material que ha demostrat tenir unes característiques mecàniques que el fan viable, les fibres vegetals incorporades experimenten poca durabilitat.

## Resumen

Actualmente se conoce un nuevo tipo de cambio climático, a parte del provocado naturalmente por los gases de la atmosfera, que es debido a la actividad humana. La industria de la construcción contribuye en gran parte a la emisión de gases de efecto invernadero, concretamente CO<sub>2</sub>. La producción de cemento Portland es de 6 billones de toneladas por año, y cada tonelada producida genera 0.55 toneladas de CO<sub>2</sub> químico y 0.39 toneladas de CO<sub>2</sub> adicionales procedentes del combustible usado en la cocción y el molturado.

Estos hechos han derivado en que la investigación científica haya aumentado el interés en los materiales de construcción sostenibles con baja huella de carbono. En esta línea se encuentran ramas de estudio con la voluntad de sustituir el cemento Portland por aluminosilicatos activados con álcali y las fibras sintéticas por fibras vegetales.

El presente estudio tiene como objetivo comprobar la viabilidad de los geopolímeros como matriz sostenible para la producción de fibrocementos reforzados con fibras vegetales.

Para alcanzar el objetivo se ha buscado la dosificación con propiedades más optimas de la matriz de geopolímero mediante el ensayo de probetas a flexión y a compresión, así como también se ha hecho el análisis de difracción de rayos X (DRX), espectroscopía de infrarrojos por transformada de Fourier (FTIR) y termogravimetría (TGA). En segundo lugar, se ha estudiado la viabilidad y durabilidad de la pulpa Kraft incorporada en la matriz de geopolímero mediante la realización de probetas que se han ensayado a flexión y a compresión, se han sometido a ciclos seco-húmedo, así como también se han estudiado con SEM y BSE SEM.

Se ha concluido que, aunque la matriz de geopolímero con pulpa Kraft es un material que ha demostrado tener unas características mecánicas que lo hacen viable, las fibras vegetales incorporadas experimentan poca durabilidad.

## Abstract

Nowadays, a new type of climate change is known, aside from the natural caused by the atmosphere gases, which is due to human activity. The construction industry contributes largely to the emission of greenhouse gases because of CO<sub>2</sub>. Portland cement production is 6 billion tonnes per year, and each ton produced produces 0.55 tonnes of chemical CO<sub>2</sub> and 0.39 tonnes of additional CO<sub>2</sub> from the fuel used in baking and milling.

These facts have led scientific research to focus on sustainable building materials with a low carbon footprint. In this line we find branches of study with the intention of replacing the Portland cement for aluminosilicates activated with alkali and the synthetic fibers for vegetable fibers.

The present study aims to verify the viability of geopolymers as a sustainable matrix to produce cement reinforced with plant fibers.

To achieve the goal, the dosage with the most optimal properties of the geopolímer matrix has been sought by testing flexibility and compression on samples, as well as the X-ray diffraction analysis (DRX), infrared spectroscopy for Fourier transform (FTIR) and thermogravimetry (TGA). Secondly, the viability and durability of the Kraft pulp incorporated in the geopolímer matrix has been studied by means of the production of samples that have been tested on flexion and compression, subjected to drying-humidity cycles, as well as they have also been studied with SEM and BSE SEM.

It has been concluded that although the geopolímer matrix with Kraft pulp is a material that has proven to have some mechanical characteristics that make it viable, the incorporated plant fibers showed little durability.

## Sumari

Resum .....	2
Resumen .....	3
Abstract .....	4
Índex de figures .....	9
Índex de taules .....	16
Símbols i acrònims .....	17
Agraïments.....	18
1. Introducció.....	19
1.1. Context mediambiental .....	19
1.1.1 Canvi climàtic .....	19
1.1.2 Indústria de la construcció .....	19
1.1.3 Una alternativa sostenible .....	20
1.2. Els geopolímers .....	21
1.2.1 Reacció de geopolimerització .....	21
1.2.2. Components dels geopolímers.....	22
1.2.2.1. Components aluminosilicats .....	22
1.2.2.2. Altres silicats.....	23
1.2.2.4. Activadors alcalins .....	24
1.2.3. Caracterització dels geopolímers .....	24
1.2.3.1 Relació molar Si/Al.....	24

1.2.3.2 Relació molar Na/Al .....	25
1.2.3.3 Relació molar H <sub>2</sub> O/ Na <sub>2</sub> O.....	26
1.2.3.4 Porositat .....	26
1.2.3.5 Temps de configuració total .....	27
1.2.4. Resistència al foc i a ambients agressius.....	27
1.3. Fibres.....	28
1.3.1. Fibrociment .....	28
2. Objectius de l'estudi .....	30
3. Materials i mètodes.....	31
3.1. Materials .....	31
3.2. Mètodes .....	34
3.2.1. Estudi de dosificació prèvia de la matriu .....	34
3.2.1.1. Fabricació de les provetes .....	36
3.2.1.2. Assaig mecànic de les provetes .....	37
3.2.2. Millora de la matriu .....	39
3.2.3. Caracterització de les matrius definitives .....	41
3.2.4. Caracterització del material compost .....	44
3.3. Microestructura i anàlisi química de la matriu .....	48
3.3.1. Difracció de Raig X (DRX) .....	48
3.3.2. Anàlisi termogravimètrica (TGA) .....	49

3.3.3. Espectroscòpia d'infrarojos per transformada de Fourier (FTIR) .....	49
3.3.4. Microscòpia electrònica (SEM BSE).....	49
3.4. Durabilitat de les fibres.....	50
3.4.1. Microscòpia electrònica (SEM) .....	50
4. Anàlisi de resultats.....	51
4.1. Assajos mecànics.....	51
4.1.1. Resultats de l'estudi de la dosificació prèvia de la matriu .....	53
4.1.1.1. Resultats de l'assaig a flexió .....	54
4.1.1.2. Resultats de l'assaig a compressió .....	55
4.1.2. Resultats de la millora de la matriu .....	56
4.1.2.1. Resultats de l'assaig a flexió .....	56
4.1.2.2. Resultats de l'assaig a compressió .....	57
4.1.3. Resultats de la matriu definitiva .....	58
4.1.3.1. Resultats de l'assaig a flexió .....	59
4.1.3.2. Resultats de l'assaig a compressió .....	60
4.1.4. Resultats del material compost .....	61
4.1.4.1. Resultats de l'assaig a flexió .....	61
4.1.4.2. Resultats de l'assaig a compressió .....	65
4.2. Resultats de microestructura i anàlisi química de la matriu .....	68
4.2.1. Difracció de Raig X (DRX).....	68

4.2.2. Espectroscòpia d'infrarojos per transformada de Fourier (FTIR) .....	69
4.2.2. Anàlisi termogravimètrica (TGA).....	71
4.2.3. Microscòpia electrònica (SEM BSE).....	72
4.3. Resultats de durabilitat de les fibres .....	76
4.3.1. Microscòpia electrònica (SEM) .....	76
4.4. Resum de discussió .....	78
Conclusions.....	79
Bibliografia.....	81
Referències bibliogràfiques.....	81
Annexos .....	87
Annex A. Fitxes tècniques dels materials usats.....	88



## Índex de figures

Figura 1 Micrografia SEM de les fibres de polpa Kraft (Font pròpia).....	33
Figura 2 Motlles per a la fabricació de provetes segons la norma UNE-EN 196-1 (AENOR, 2005).....	36
Figura 3 (A) MK abans de ser mesclat; (B) Mescla de geopolímer; (C) Motlle emplenat amb la mescla de geopolímer i col·locat a la compactadora; (D) Provetes desemmotllades (Font pròpia). ....	37
Figura 4 Dispositiu de càrrega per a la determinació de la resistència a flexió (AENOR, 2005).....	38
Figura 5 Dispositiu de càrrega per a l'assaig a compressió (AENOR, 2005). ....	38
Figura 6 (A) Proveta amb la superfície esquerdada; (B) Provetes sotmeses a cicles assecat-humitejat en remull; (C) Provetes cobertes amb film de plàstic per que no s'esquerdin (Font pròpia). ....	42
Figura 7 (A) Material compost en el motlle comprimit per la premsa manual; (B) Provetes de material compost desemmotllades; (C) Provetes a l'estufa; (D) Provetes sotmeses a cicles d'assecat-humitejat en remull (Font pròpia). ....	48
Figura 8 (A) Microscopi electrònic de feix de llums focalitzats(SEM); (B) Microscopi electrònic amb detector d'electrons retrodispersats (SEM BSE) (Font pròpia). ....	50
Figura 9 Microscopi electrònic amb detector d'electrons secundaris (SEM) (Font pròpia). ....	50
Figura 10 Tipologia de gràfica segons si la proveta és de material compost (a) o de matriu sola (b). ....	52

Figura 11 Exemple d'una recta de regressió generada per al càlcul del mòdul d'elasticitat (MOE).....	53
Figura 12 Resultat del càlcul del Mòdul d'elasticitat (MOE) de cada una de les dosificacions, de l'estudi de la dosificació prèvia, calculat a partir de 3 mostres assajades a flexió en les mateixes condicions. La barra d'error correspon a la desviació estàndard. ....	54
Figura 13 Resultat del càlcul del Punt de ruptura (MOR) de cada una de les dosificacions, de l'estudi de la dosificació prèvia, calculat a partir de 3 mostres assajades a flexió en les mateixes condicions. La barra d'error correspon a la desviació estàndard.....	54
Figura 14 Resultat del càlcul del Mòdul d'elasticitat (MOE) de cada una de les dosificacions, de l'estudi de la dosificació prèvia, calculat a partir de 3 mostres assajades a compressió en les mateixes condicions. La barra d'error correspon a la desviació estàndard.....	55
Figura 15 Resultat del càlcul del Punt de ruptura (MOR) de cada una de les dosificacions, de l'estudi de la dosificació prèvia, calculat a partir de 3 mostres assajades a compressió en les mateixes condicions. La barra d'error correspon a la desviació estàndard. ....	55
Figura 16 Resultat del càlcul del Punt de ruptura (MOR) de cada una de les dosificacions i cada temps de molturat del FS, de la millora de la matriu, calculat a partir de 3 mostres assajades a flexió en les mateixes condicions. La barra d'error correspon a la desviació estàndard.....	56
Figura 17 Resultat del càlcul del Mòdul d'elasticitat (MOE) de cada una de les dosificacions i cada temps de molturat del FS, de la millora de la matriu, calculat a partir de 3 mostres assajades a flexió en les mateixes condicions. La barra d'error correspon a la desviació estàndard. ....	57

Figura 18 Resultat del càlcul del Punt de ruptura (MOR) de cada una de les dosificacions i cada temps de molturat del FS, de la millora de la matriu, calculat a partir de 3 mostres assajades a compressió en les mateixes condicions. La barra d'error correspon a la desviació estàndard.....	57
Figura 19 Resultat del càlcul del Mòdul d'elasticitat (MOE) de cada una de les dosificacions i cada temps de molturat del FS, de la millora de la matriu, calculat a partir de 3 mostres assajades a compressió en les mateixes condicions. La barra d'error correspon a la desviació estàndard.....	58
Figura 20 Resultat del càlcul del Mòdul d'elasticitat (MOE) de cada una de les dosificacions i cada tipus de curat, de la matriu definitiva, calculat a partir de 3 mostres assajades a flexió en les mateixes condicions. La barra d'error correspon a la desviació estàndard.....	59
Figura 21 Resultat del càlcul del Punt de ruptura (MOR) de cada una de les dosificacions i cada tipus de curat, de la matriu definitiva, calculat a partir de 3 mostres assajades a flexió en les mateixes condicions. La barra d'error correspon a la desviació estàndard. ....	59
Figura 22 Resultat del càlcul del Mòdul d'elasticitat (MOE) de cada una de les dosificacions i cada tipus de curat, de la matriu definitiva, calculat a partir de 3 mostres assajades a compressió en les mateixes condicions. La barra d'error correspon a la desviació estàndard.....	60
Figura 23 Resultat del càlcul del Punt de ruptura (MOR) de cada una de les dosificacions i cada tipus de curat, de la matriu definitiva, calculat a partir de 3 mostres assajades a compressió en les mateixes condicions. La barra d'error correspon a la desviació estàndard.....	60

Figura 24 Valors de tensió a flexió per a la dosificació amb un contingut d'aigua de 575 ml i segons el tipus de curat. ....	61
Figura 25 Valors de tensió a flexió per a la dosificació amb un contingut d'aigua de 650 ml i segons el tipus de curat. ....	62
Figura 26 Valors de tensió a flexió per a la dosificació amb un contingut d'aigua de 725 ml i segons el tipus de curat. ....	62
Figura 27 Resultat del càlcul del Mòdul d'elasticitat (MOE) de cada una de les dosificacions i cada tipus de curat, del material compost, calculat a partir de 3 mostres assajades a flexió en les mateixes condicions. La barra d'error correspon a la desviació estàndard.....	63
Figura 28 Resultat del càlcul del Punt de ruptura (MOR) de cada una de les dosificacions i cada tipus de curat, del material compost, calculat a partir de 3 mostres assajades a flexió en les mateixes condicions. La barra d'error correspon a la desviació estàndard. ....	63
Figura 29 Resultat del càlcul de l'Energia específica de cada una de les dosificacions i cada tipus de curat, del material compost, calculada a partir de 3 mostres assajades a flexió en les mateixes condicions. La barra d'error correspon a la desviació estàndard. ....	64
Figura 30 Valors de tensió a compressió per a la dosificació amb un contingut d'aigua de 575 ml i segons el tipus de curat. ....	65
Figura 31 Valors de tensió a compressió per a la dosificació amb un contingut d'aigua de 650 ml i segons el tipus de curat. ....	65
Figura 32 Valors de tensió a compressió per a la dosificació amb un contingut d'aigua de 725 ml i segons el tipus de curat. ....	66

Figura 33 Resultat del càlcul del Mòdul d'elasticitat (MOE) de cada una de les dosificacions i cada tipus de curat, del material compost, calculat a partir de 3 mostres assajades a compressió en les mateixes condicions. La barra d'error correspon a la desviació estàndard..... 66

Figura 34 Resultat del càlcul del Punt de ruptura (MOR) de cada una de les dosificacions i cada tipus de curat, del material compost, calculat a partir de 3 mostres assajades a compressió en les mateixes condicions. La barra d'error correspon a la desviació estàndard..... 67

Figura 35 Resultat del càlcul de l'Energia específica de cada una de les dosificacions i cada tipus de curat, del material compost, calculat a partir de 3 mostres assajades a compressió en les mateixes condicions. La barra d'error correspon a la desviació estàndard..... 67

Figura 36 DRX de les matrius de geopolímer per a les diferents dosificacions i tipus de curat i per al MK i FS: (1A) Dosificació amb 575 ml d'aigua i curada a temperatura ambient (20 °C); (2A) Dosificació amb 650 ml d'aigua i curada a temperatura ambient (20 °C); (3A) Dosificació amb 725 ml d'aigua i curada a temperatura ambient (20 °C); (1E) Dosificació amb 575 ml d'aigua i curada a l'estufa (60 °C); (2E) Dosificació amb 650 ml d'aigua i curada a l'estufa (60 °C); (3E) Dosificació amb 725 ml d'aigua i curada a l'estufa (60 °C). ..... 68

Figura 37 Espectre FTIR de les matrius de geopolímer per a les diferents dosificacions i tipus de curat: (1A) Dosificació amb 575 ml d'aigua i curada a temperatura ambient (20 °C); (2A) Dosificació amb 650 ml d'aigua i curada a temperatura ambient (20 °C); (3A) Dosificació amb 725 ml d'aigua i curada a temperatura ambient (20 °C). ..... 69

Figura 38 Espectre FTIR de les matrius de geopolímer per a les diferents dosificacions i tipus de curat: (1E) Dosificació amb 575 ml d'aigua i curada a l'estufa (60 °C); (2E) Dosificació amb 650 ml d'aigua i curada a l'estufa (60 °C); (3E) Dosificació amb 725 ml d'aigua i curada a l'estufa (60 °C). .....	70
Figura 39 TGA de les matrius de geopolímer per a les diferents dosificacions i tipus de curat: (1A) Dosificació amb 575 ml d'aigua i curada a temperatura ambient (20 °C); (2A) Dosificació amb 650 ml d'aigua i curada a temperatura ambient (20 °C); (3A) Dosificació amb 725 ml d'aigua i curada a temperatura ambient (20 °C); (1E) Dosificació amb 575 ml d'aigua i curada a l'estufa (60 °C); (2E) Dosificació amb 650 ml d'aigua i curada a l'estufa (60 °C); (3E) Dosificació amb 725 ml d'aigua i curada a l'estufa (60 °C). .....	71
Figura 40 Microestructura i composició química del material compost (SEM BSE) corresponent a la dosificació amb 575 ml d'aigua i curada a 20 °C (Font pròpia).....	72
Figura 41 Composició EDS de la partícula de FS sense reaccionar (Font pròpia). .....	73
Figura 42 Composició EDS de la partícula de MK sense reaccionar (Font pròpia).....	73
Figura 43 Composició EDS del gel de geopolímer (Font pròpia). .....	73
Figura 44 Microestructura i composició del material compost (SEM BSE) corresponent a la dosificació amb 650 ml d'aigua i curada a 60 °C (Font pròpia). .....	74
Figura 45 Mapes d'intensitat dels components de la figura 44 (Font pròpia). .....	74
Figura 46 Microestructura de les provetes de material compost amb dosificació de 575 ml d'aigua curat a 20 °C (A) i a 60 °C (B) (Font pròpia).....	75
Figura 47 Microestructura de les provetes de material compost amb dosificació de 650 ml d'aigua curat a 20 °C (A) i a 60 °C (B) (Font pròpia).....	75
Figura 48 Microestructura de les provetes de material compost amb dosificació de 725 ml d'aigua curat a 20 °C (A) i a 60 °C (B) (Font pròpia).....	75

Figura 49 Imatges SEM del material compost: (A) Proveta curada a ambient (20 °C) durant 7 dies; (B) Proveta curada a ambient (20 °C) durant 7 dies i sotmesa a 25 cicles d'assecat-humitejat, ambdós corresponen a la dosificació de 575 ml d'aigua. .... 76

Figura 50 Imatges SEM del material compost: (A-1 i A-2) Proveta curada a ambient (20 °C) durant 7 dies; (B-1 i B-2) Proveta curada a ambient (20 °C) durant 7 dies i sotmesa a 25 cicles d'assecat-humitejat, ambdós corresponen a la dosificació de 575 ml d'aigua. .... 77

## Índex de taules

Taula 1 Composició de l'hidròxid de sodi.....	32
Taula 2 Composició i característiques principals del Metacaolí Peser.....	32
Taula 3 Composició i característiques principals del fum de sílice. ....	32
Taula 4 Característiques morfològiques de la fibra de polpa Kraft utilitzada en la producció del material compost mesurades amb un Kajaani FS300 Analyzer segons la norma ISO 16065-1, sobre una mostra de més de 10000 fibres. ....	33
Taula 5 Característiques físiques de la fibra de polpa Kraft utilitzada en la producció del material compost.....	33
Taula 6 Disseny experimental i nomenclatura dels assajos mecànics de l'estudi de dosificació prèvia de la matriu. ....	34
Taula 7 Disseny experimental i nomenclatura dels assajos mecànics de la primera millora de la matriu.....	40
Taula 8 Disseny experimental i nomenclatura dels assajos mecànics de la segona millora de la matriu.....	41
Taula 9 Disseny experimental i nomenclatura dels assajos mecànics de la matriu definitiva.....	43
Taula 10 Disseny experimental i nomenclatura dels assajos mecànics del material compost.....	45



## Símbols i acrònims

<b>Al</b>	Alumini
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	Alúmina
<b>BSE</b>	Detector d'electrons retrodispersats
<b>CO<sub>2</sub></b>	Diòxid de carboni
<b>CaO</b>	Òxid de calci
<b>DRX</b>	Difracció de raigs X
<b>EDS</b>	Dispersió d'energia radiogràfica
<b>FS</b>	Fum de sílice
<b>kJ</b>	Quilo-joule
<b>kN</b>	Kilonewton
<b>MgO</b>	Òxid de magnesi
<b>MPa</b>	Megapascal
<b>MOR</b>	Mòdul de ruptura
<b>MOE</b>	Mòdul d'elasticitat
<b>MK</b>	Metacaolí
<b>N</b>	Newton
<b>Na</b>	Sodi
<b>NaOH</b>	Hidròxid de sodi
<b>Na<sub>2</sub>O</b>	Òxid de sodi
<b>O</b>	Oxigen
<b>p/p</b>	Concentració en pes
<b>Si</b>	Silici
<b>SiO<sub>2</sub></b>	Òxid de silici
<b>SEM</b>	Microscopi electrònic
<b>TGA</b>	Anàlisi termogravimètrica
<b>tg (α)</b>	Tangent d'alfa
<b>W/S</b>	Relació aigua/sòlid

## **Agraïments**

En primer lloc m'agradaria agrair a la Beca Col·laboració en departaments universitaris que he rebut per part del Ministeri d'Educació, Cultura i Esports, i ha fet possible aquest projecte.

A continuació donar les gràcies al meu tutor Josep Claramunt per haver-me donat l'oportunitat d'aprendre sobre un àmbit nou per a mi i per l'ajuda rebuda sempre que ha estat necessària.

Finalment gràcies a la meva família per ser-hi sempre.

## **1. Introducció**

### **1.1. Context mediambiental**

#### **1.1.1 Canvi climàtic**

El clima mundial ha evolucionat sempre de manera natural, però proves convincents obtingudes arreu del món revelen que en l'actualitat hi ha en marxa un nou tipus de canvi climàtic degut directament o indirectament a l'activitat humana, que altera la composició de l'atmosfera mundial i que se suma a la variabilitat natural del clima, observada durant períodes de temps comparables (Brundtland 1987).

A l'atmosfera que embolcalla el nostre planeta, hi ha una sèrie de gasos (sobretot el vapor d'aigua i el diòxid de carboni) que tenen un efecte d'hivernacle, és a dir, absorbeixen i reemetten la radiació infraroja. D'aquesta manera, impedeixen que part d'aquesta radiació escapi de la terra i contribueixen a que la temperatura mitjana de l'aire superficial del planeta sigui d'uns 15 °C, una temperatura apta per a la vida. L'efecte d'hivernacle és, per tant, un fenomen natural de l'atmosfera (Institut d'Estudis Catalans 2016).

El problema actual és que la quantitat d'aquests gasos naturals amb efecte d'hivernacle a l'atmosfera ha augmentat i que s'hi han abocat, a més, gasos amb efecte d'hivernacle no presents de forma natural a l'atmosfera. Aquest canvi s'admet que posa en perill la composició, la capacitat de recuperació i la productivitat dels ecosistemes naturals i el desenvolupament econòmic i social, la salut i benestar de la humanitat. El canvi climàtic és un afer global, i molts països ja intenten disminuir les seves emissions de gasos d'efecte hivernacle per reduir l'impacte mediambiental (Ismail et al. 2014).

#### **1.1.2 Indústria de la construcció**

La indústria de la construcció, amb una demanda en constant augment, a banda de generar grans quantitats de residus, gastar molta energia i consumir materials, contribueix en gran part a l'emissió de gasos d'efecte hivernacle, especialment CO<sub>2</sub> (Onuaguluchi y Banthia 2016).

La producció de ciment Portland és una de les principals causes d'efecte hivernacle (Lahoti et al. 2017). La producció d'una tona de ciment genera 0.55 tones de CO<sub>2</sub> químic i 0.39 tones de CO<sub>2</sub> addicionals provinents de les emissions de combustible usat en la cocció i el molturat, sumant així un total de 0.94 tones de CO<sub>2</sub> per tona de ciment generat.

Algunes estimacions indiquen que cada any es produeixen aproximadament sis bilions de tones de ciment (Rowles et al. 2003). Estudis realitzats assenyalen que la demanda global es pot veure un 200 % augmentada l'any 2050 respecte els valors més o menys actuals. Aquest fet és seriós en el context actual de canvi climàtic causat principalment per les emissions de CO<sub>2</sub>, essent aquest un possible responsable d'una futura crisi econòmica mundial (Pacheco-Torgal et al. 2011).

L'actual recerca de materials més perdurables que el ciment Portland es deu també al deteriorament sofert per les estructures fetes amb formigó a base de ciment. A banda dels problemes de durabilitat derivats del mal disseny i/o execució dels elements constructius, el fet és que la durabilitat del ciment Portland va intrínsecament relacionada amb les propietats del material. L'elevada permeabilitat permet l'entrada d'aigua i d'altres elements agressius, derivant en possibles problemes de corrosió deguts als atacs de diversos ions. Aquests successos impliquen accions de conservació cares o la construcció de noves estructures que fan que encara resulti menys sostenible (Pacheco-Torgal et al. 2011).

### **1.1.3 Una alternativa sostenible**

La necessitat de reduir les emissions de gasos d'efecte hivernacle generades en la producció del ciment Portland i la necessitat de nous materials amb una durabilitat major, ha fet que la recerca científica hagi augmentat el seu interès pels materials de construcció sostenibles de baixa petjada de carboni. En aquesta línia trobem les fibres vegetals en confrontació amb les fibres sintètiques i, l'objecte del present estudi, els materials de construcció fets amb aluminosilicats activats amb àlcalis en front el ciment Portland. Encara que força de la recerca en aquest àmbit ha estat publicada com a "materials activats amb àlcalis", el terme "geopolímer" és l'acceptat generalment per a aquesta tecnologia (Pacheco-Torgal et al. 2011).

Algunes de les característiques principals dels geopolímers són la seva elevada força mecànica, l'excel·lent durabilitat i, sobretot, el baix consum energètic i la baixa emissió de CO<sub>2</sub> durant la seva producció (Zhang et al. 2017). La producció de geopolímers genera un 80 % menys de diòxid de carboni que el ciment Portland (Pacheco-Torgal et al. 2011). A més a més alguns materials principals usats en la seva producció, com per exemple determinades cendres i escòries, són subproductes de la indústria. Per tant, el geopolímer és, en potència, una alternativa sostenible i econòmica al ciment Portland habitual (Lahoti et al. 2017; Borges et al. 2016; Rodriguez et al. 2013; Deb, Sarker y Barbhuiya 2016).

## **1.2. Els geopolímers**

A finals del 1970, el professor Joseph Davidovits va introduir el concepte “geopolímer”, que va ser escollit per descriure una família d'aluminosilcats activats amb un àlcali. La formació de geopolímers estava basada en una reacció entre dues parts de materials: l'activador alcalí i l'aluminosilcat precursor, que en aquell moment, el començament de la recerca en aquest àmbit, era majoritàriament metacaolí (Lahoti et al. 2017; Zhang et al. 2016). El que nosaltres anomenem “geopolímers”, en la literatura, també es troba com a “vidre d'aluminosilcat a baixa temperatura”, “geociment”, “ceràmica unida alcalinament”, “polímer inorgànic” i “hidroceràmica” (Duxson, Fernández-Jiménez, et al. 2007).

### **1.2.1 Reacció de geopolimerització**

La geopolimerització engloba una reacció química entre varis òxids alumino-silcats amb altres silcats sota condicions altament alcalines, generant enllaços polimèrics (-Si-O-Al-O-), (-Si-O-Al-O-Si-O-) i (-Si-O-Al-O-Si-O-Si-O-) que indiquen que qualsevol material amb alt contingut en silici i alumini pot esdevenir una font de geopolimerització (Duxson et al. 2005; Pacheco-Torgal et al. 2011; Rowles et al. 2003; Lahoti et al. 2017; James Hardie International Group Limited 2007). El procés de producció comença amb pols d'aluminosilcat o una barreja de diferents materials rics en SiO<sub>2</sub> i Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Aquests precursors es mesclen amb una solució altament alcalina, normalment formada per un hidròxid alcalí i silicat alcalí. L'elevat pH de la solució activadora dissol l'aluminosilcat i

d'això en resulta una pasta que a través d'una sèrie de reaccions químiques dona un material sòlid, que endureix i desenvolupa una força mecànica que en ocasions pot ser comparable o superior a la dels materials basats en ciment Portland (Borges et al. 2016).

En definitiva, els geopolímers es formen quan la pols d'aluminosilicat es mescla amb l'activador alcalí amb una dosificació adequada. Per tant els paràmetres que governen la reacció són el tipus d'aluminosilicat i les seves propietats, el tipus d'activador i la dosificació, i les condicions en que es realitza la reacció (Zhang et al. 2016).

### **1.2.2. Components dels geopolímers**

Les característiques químiques i estructurals més fonamentals s'estudien per conèixer els efectes de la selecció de matèries primeres en les propietats dels geopolímers. És sabut que les matèries primeres i les condicions de producció són crítiques en la determinació del comportament en la formació, la funcionalitat i les propietats químiques i físiques dels productes a base de geopolímers (Duxson, Fernández-Jiménez, et al. 2007).

#### **1.2.2.1. Components aluminosilicats**

Els aluminosilicats són la matèria primera principal en la producció de geopolímers. S'anomena generalment aluminosilicat als silicats dobles d'alumini i d'un altre metall, monovalent o divalent. En aquest treball però, s'utilitza aquest mot per referir-se a aquells silicats que contenen majoritàriament òxid d'alumini ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) i òxid de silici ( $\text{SiO}_2$ ).

Dos de les matèries primeres més importants en la producció de geopolímers són les cendres volants i el metacaolí pel fet de ser font de  $\text{SiO}_2$  i  $\text{Al}_2\text{O}_3$  en un únic material (Borges et al. 2016). Juntament amb aquests dos materials, trobem l'escòria d'alt forn que també ha esdevingut una matèria primera molt utilitzada en aquest àmbit.

Les cendres volants són un residu industrial, generades normalment durant la combustió del carbó i no deriven d'un material ben definit. La major part d'aquesta matèria primera està formada per  $\text{SiO}_2$ , alumini i òxids de ferro, així com també calci en les cendres anomenades de tipus C. Les partícules de cendres volants normalment són esfèriques,

però poc homogènies, així com també tenen una quantitat més elevada i heterogènia d'impureses (Duxson, Fernández-Jiménez, et al. 2007).

D'altra banda l'escòria d'alt forn és un subproducte de la producció de ferro i acer en alt forn. En un inici és un producte granular vidriós, però després s'asseca i es trosseja en pols fina. La composició química de l'escòria depèn considerablement de la composició de les matèries primeres del procés de producció dels ferros. Tot i això els components principals són CaO (30-50 %), SiO<sub>2</sub> (28-38 %), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (8-24 %) i MgO (1-18 %).

Malgrat això i el fet que les cendres volants i l'escòria d'alt forn han esdevingut els dos materials més usats actualment en els productes a base de geopolímers, i havent-se demostrat que els geopolímers a base de cendres volants són més duradors i forts, el metacaolí provablement és el material més prometedor per a aquesta producció en el futur. Això és degut al fet que el metacaolí té una composició química més constant que les cendres volants i l'escòria d'alt forn, i resulta predictable a l'hora d'elaborar els productes (Zhang et al. 2016; Duxson, Fernández-Jiménez, et al. 2007).

El metacaolí és un producte de la calcinació del mineral caolinita. La calcinació es realitza entre 600-850 °C i d'aquesta manera es transforma en una fase amorfa que anomenem metacaolí (Zhang et al. 2016).

Els geopolímers basats en l'activació alcalina de metacaolí han guanyat interès en els últims 40 anys, no solament perquè tingui una excel·lent estabilitat tèrmica, si no que també perquè tenen propietats mecàniques comparables a les dels ciments, que permeten considerar-los una alternativa sostenible al ciment Portland (Zhang et al. 2016) i perquè el metacaolí és desenvolupa ràpidament en la geopolimerització a diferència d'altres precursors com les cendres volants (Lahoti et al. 2017). A banda, com s'ha esmentat anteriorment, els geopolímers basats en metacaolí poden ser produïts a consciència, és a dir, amb unes propietats predictibles durant la preparació i també les propietats quan ja s'ha desenvolupat (Duxson, Fernández-Jiménez, et al. 2007).

#### 1.2.2.2. Altres silicats

A banda de matèries primeres d'aluminosilicats, en les dosificacions d'alguns geopolímers, també hi trobem altres tipus de silicats. Aquests aporten més contingut

en silici, fet important per complir la relació molar Si/Al desitjada que resulta molt determinant en la caracterització dels geopolímers. El fum de sílice és el silicat més comunament utilitzat, i consisteix primàriament en diòxid de silici amorf ( $\text{SiO}_2$ ) no cristal·lí. És un subproducte de la producció de metall de silici o aliatges de ferrosilici, que degut a les propietats químiques i físiques esdevé una putzolana molt reactiva. El formigó que conté fum de sílice pot aconseguir uns valor elevats de resistència i pot ser molt durador.

#### 1.2.2.4. Activadors alcalins

En l'activació d'aluminosilicats la naturalesa de la solució activadora exerceix un paper important en la determinació de les característiques mecàniques i estructurals (Duxson, Mallicoat, et al. 2007). Les característiques més rellevants relacionades amb l'activador són: el tipus d'àlcali utilitzat, el mètode com s'addiciona el component alcalí (com a solució o en estat sòlid), i la dosificació del component alcalí, normalment expressada en relacions molars considerant la composició total de les matèries primeres. El catió que dona la solució alcalina, influeix els primers estadis de la formació del geopolímer, i en conseqüència les propietats mecàniques del producte final. Els activadors utilitzats convencionalment són l'hidròxid de sodi o de potassi, i/o silicat de sodi o de potassi addicionats en forma de solució aquosa molt concentrada. Els activadors basats en sodi donen una resistència a compressió superior comparats amb els activadors basats amb potassi (Rodriguez et al. 2013)(A. Palomo et al. 2004).

#### 1.2.3. Caracterització dels geopolímers

Les característiques dels geopolímers poden ser adaptades per a obtenir les propietats químiques, mecàniques, de microestructura i tèrmiques desitjades si es controlen diferents relacions com són les proporcions molars Si/Al, Na/Al,  $\text{H}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$  i la relació p/p aigua/sòlids (W/S).

##### 1.2.3.1 Relació molar Si/Al

La similitud entre geopolímers amb les mateixes relacions Si/Al i les grans diferències entre geopolímers amb relacions Si/Al diferents mostren la gran influència d'aquest



factor en la microestructura dels geopolímers i que les influències de les altres tres relacions (Na/Al, aigua/sòlids i  $H_2O/Na_2O$ ) no són tant significatives com aquesta (Lahoti et al. 2017).

En primer lloc la relació Si/Al ens determina la resistència mecànica a compressió i flexió que tindrà el geopolímer. Teòricament els enllaços Si-O-Si són més forts que els enllaços Si-O-Al o els enllaços Al-O-Al. Això significa que la força del geopolímer hauria d'incrementar amb la relació Si/Al ja que la densitat dels enllaços Si-O-Si augmenta amb la relació Si/Al. Aquest fet és així fins superar la proporció 1.9, moment en el que comença la disminució de la força mecànica. Aquest fet fa veure que hi ha altres factors que afecten les propietats mecàniques. La quantitat de material sense reaccionar sembla que augmenta amb la relació Si/Al. Es creu que quantitats grans de material sense reaccionar augmenten el defecte de densitat en les mostres i té un efecte negatiu en la resistència mecànica dels geopolímers. Aquest defecte és pronunciat a elevades proporcions Si/Al on la quantitat de material sense reaccionar s'ha observat que és el màxim (Duxson et al. 2005; Lahoti et al. 2017).

Per tant sabem que la resistència mecànica és dominada per la fracció de gel del geopolímers i que una relació Si/Al elevada (1.7) és més favorable pel desenvolupament del geopolímer i les propietats mecàniques, però una relació Si/Al excessiva té un efecte negatiu.

#### 1.2.3.2 Relació molar Na/Al

D'altra banda pel que fa l'efecte de la relació Na/Al, tot i no ser un paràmetre tant determinant com la relació Si/Al, en les propietats macromecàniques del geopolímer pot tenir una certa influència per dues raons: un elevat Na/Al es beneficiós per al desenvolupament del geopolímer però una concentració alcalina excessiva aporta un excés de Na i debilita l'estructura dels geopolímers, i un elevat Na/Al també es més favorable per al desenvolupament de les propietats mecàniques als estadis inicials ja que accelera la dissolució dels tetraedres de silici i alumini per formar un gel ric amb alumini (Zhang et al. 2017).

En definitiva la fracció del gel de geopolímer augmenta positivament amb la relació Na/Al entre 0.8 i 1 i disminueix a partir de 1.1, debilitant el geopolímer (Zhang et al. 2017).

#### 1.2.3.3 Relació molar $H_2O/Na_2O$

Pel que fa a la relació molar  $H_2O/Na_2O$  la seva importància radica en la reacció de geopolimerització ja que aquesta relació determina l'alcalinitat del sistema i afecta els graus de geopolimerització (Lahoti et al. 2017). La relació molar més òptima d'aquest paràmetre és aquella que s'apropa a 11.

#### 1.2.3.4 Porositat

Un paràmetre molt important que determina les propietats (resistència, mòdul de Young, permeabilitat, durabilitat, difusió...) dels geopolímers és la porositat i la mida dels porus. Les cavitats i grans porus presents en l'estructura poden esdevenir nuclis de fractura i també fonts de baixa resistència promovent la propagació de les fractures. La força de la matriu del geopolímer incrementa amb l'augment de la quantitat de silici ja que els enllaços Si-O-Si, com ja s'ha dit, tenen una força superior als enllaços Si-O-Al o Al-O-Al. La fortalesa és un indicador de qualitat del geopolímer i està més influenciada per la mida dels porus que per la porositat total. Sembla ser que la relació Si/Al és un paràmetre important per al control de la porositat total i de la mida dels porus en les matrius dels geopolímers (Kamseu et al. 2013). Els geopolímers amb relacions Si/Al  $\leq 1.40$  mostren una estructura amb porus més grans i interconnectats, precipitats poc estructurats i material sense reaccionar, derivant en una força mecànica i una resistència a flexió més baixes. Geopolímers amb proporcions Si/Al  $\geq 1.65$  es caracteritzen per tenir un aglutinant, en gran part homogeni, que conté partícules no reaccionades i alguns porus aïllats més petits d'unes poques micres de mida. Les microestructures dels geopolímers amb relació Si/Al  $\geq 1.65$  no canvien significativament amb l'augment de la relació Si/Al. Tot i això hi ha una lleugera disminució de la porositat en les mostres amb Si/Al de 1.7, que correspon amb la relació en que s'observa la màxima resistència a compressió i a flexió (Duxson et al. 2005).

#### 1.2.3.5 Temps de configuració total

La caracterització dels geopolímers també passa per controlar el temps de configuració total, que es defineix com el temps que passa entre la mescla de tots els components del geopolímer fins al moment que una agulla no pugui deixar una marca circular completa a la superfície del geopolímer. En general el temps de configuració final augmenta amb la relació Si/Al però disminueix amb la relació Na/Al. El temps augmenta bastant per a mostres amb una proporció Si/Al superior a 2 o Na/Al inferior a 0.8 (Zhang et al. 2017).

#### 1.2.4. Resistència al foc i a ambients agressius

L'atenció que s'ha prestat al desenvolupament de geopolímers en les últimes dècades és degut a que molts d'aquests materials ofereixen grans avantatges en termes de força mecànica i durabilitat química però també han demostrat elevada resistència tèrmica, perdurabilitat en ambients agressius i immobilització de residus tòxics i perillosos (Borges et al. 2016)(Zuda et al. 2010)(Pan y Sanjayan 2010).

Degut a les propietats ceràmiques dels geopolímers, posseeixen una bona resistència a les temperatures elevades. Per tant, en un futur proper, es podrien posicionar de forma competitiva en vers el ciment Portland en la construcció d'infraestructures d'alt risc d'incendi com per exemple túnels i edificis de gran altura. Quan els elements portants estan exposats al foc, el comportament d'aquests depèn parcialment de les propietats mecàniques dels materials que els componen. Així, per preveure la resistència al foc de l'estructura, cal entendre les propietats mecàniques dels materials que la formen a elevada temperatura. Els geopolímers alliberen calor a temperatures entre 200-290 °C, fet que indica que s'esdevé una reacció exotèrmica. Aquesta reacció es creu que és la raó per la qual els geopolímers guanyen força a elevades temperatures (Pan y Sanjayan 2012). Per tant, degut a la seva estructura inorgànica, els geopolímers són intrínsecament resistents al foc i han demostrat tenir una excel·lent estabilitat tèrmica, molt superior a la dels ciments tradicionals que, en ser exposats a elevades temperatures, perden majoritàriament tota la seva força (Duxson et al. 2005; Kong y Sanjayan 2008; Lee y Lee 2016).

Per últim, la resistència a l'àcid és un paràmetre important per als materials de construcció quan estan exposats a ambients agressius. Els geopolímers s'ha vist que tenen més durabilitat en front a aquestes condicions comparats amb el ciment Portland. Un estudi ha mostrat que la força es redueix un 33 % en activats alcalins en comparació amb un 47 % de reducció en ciment Portland quan són exposats a un ambient àcid (pH= 4) durant 1 any (Lee y Lee 2016). Es pot dir que en ambients agressius el comportament dels geopolímers tendeix a reaccionar més favorablement que els ciments convencionals.

### **1.3. Fibres**

Les fibres són estructures, naturals o sintètiques, que per definició són notablement més llargues que amples. Des de finals del segle XIX s'han estat utilitzant per millorar les característiques de diversos materials de construcció. L'amiant ha estat el tipus de material fibrós més emprat en aquests tipus de pràctiques. Després de que les autoritats mèdiques demostrassin que els productes relacionats amb l'amiant provoquen càncer amb una elevada mortalitat, es va iniciar un moviment mundial que exigia la retirada de l'amiant d'una ampla gama de productes. El fibrociment era un dels materials que més quantitat d'amiant contenia. Des de llavors s'han estat estudiant tota mena d'alternatives a aquestes fibres perjudicials per a la salut (Coutts 2005).

#### **1.3.1. Fibrociment**

En els darrers temps la necessitat d'uns materials de construcció més econòmics, segurs i sostenibles s'ha desenvolupat com un problema global i un repte per a la indústria de la construcció per tal de produir productes de construcció respectuosos amb el medi ambient, estructuralment segurs, renovables i perdurables (Silva, Mobasher y Filho 2009; Toledo Romildo D. et al. 2003; Onuaguluchi y Banthia 2016).

En aquesta línia, des de fa uns quants anys, les fibres vegetals han obert una finestra a la investigació en la indústria de la construcció, també en els països no industrialitzats, pel fet de trobar-se de forma abundant en molts territoris, estar caracteritzades per una fàcil extracció i requerir un baix consum energètic i econòmic per a la seva producció (Silva, Mobasher y Filho 2009; Frazão et al. 2018; Toledo Romildo D. et al. 2003;

Onuaguluchi y Banthia 2016; Tonoli et al. 2013). D'aquesta manera les fibres vegetals estan guanyant interès en el terreny dels materials compostos, concretament en el reforçament de la matriu de productes fets amb ciment, anomenats fibrociments (Santos et al. 2015).

Els materials cimentosos reforçats amb fibra vegetal, a banda de ser un nou tipus de materials de construcció sostenible, són materials amb una resistència a la tracció, una ductilitat i una flexibilitat superior (Silva, Mobasher y Filho 2009; Filho, Silva y Toledo Filho 2013; Toledo Romildo D. et al. 2003; Mohr, Nanko y Kurtis 2005; Shen et al. 2008; Teixeira et al. 2018; Onuaguluchi y Banthia 2016; Trindade et al. 2018).

Tot i això l'inconvenient actual d'aquests materials compostos amb fibres vegetals és que experimenten un procés d'envelliment en ambients humits que provoca una reducció de la resistència i la duresa. Aquest problema de durabilitat està associat a un augment del trencament i desprendiment de la fibra degut a una combinació de factors com el debilitament de les fibres per acció alcalina, la mineralització de la fibra degut a la migració de productes hidratants en els espais buits de la matriu i la variació del volum de les fibres degut a l'alta capacitat d'absorció d'aigua que tenen. Per tal de solucionar aquests problemes i així augmentar la durabilitat del compost s'han estudiat diferents mesures com per exemple la impregnació de les fibres amb agents de bloqueig i repel·lents d'aigua, el segellat de la matriu porosa del sistema, la reducció de l'alcalinitat de la matriu, entre d'altres (Toledo Romildo D. et al. 2003; Santos et al. 2015; Alomayri et al. 2014). Tot i ser un sistema molt prometedor, encara requereix molta investigació a al respecte.

## 2. Objectius de l'estudi

L'objectiu fonamental d'aquest estudi consisteix en provar la idoneïtat, tant des del punt de vista mecànic com de durabilitat, de les matrius de geopolímer per fabricar fibrociments reforçats amb fibra vegetal. Per aconseguir aquest objectiu principal, se n'ha derivat dos de secundaris:

1. En primer lloc, cal fer una matriu de geopolímer amb la dosificació i sistema de fabricació que li confereixi bones propietats mecàniques i de durabilitat.
2. En segon lloc, experimentar l'efecte mecànic i la durabilitat de les fibres vegetals incorporades dins de la matriu de geopolímer, aconseguida en l'objectiu secundari 1, sota diferents condicions.

Per aconseguir amb aquests objectius s'han determinat els valors de resistència mecànica a compressió i flexió dels materials objecte d'estudi i s'ha realitzat l'anàlisi de la composició química, de microestructura i de durabilitat de les fibres mitjançant tècniques de difracció de rajos X (DRX), espectroscòpia d'infrarojos per transformada de Fourier (FTIR), termogravimetria (TGA), microscòpia electrònica amb detector d'electrons retrodispersats (SEM BSE) i microscòpia electrònica amb detector d'electrons secundaris (SEM).

### **3. Materials i mètodes**

En aquest apartat, i en consonància amb els objectius fixats, es desenvoluparà la metodologia utilitzada i els materials emprats per a la realització de la part experimental de l'estudi. Els subapartats que desenvoluparem a continuació, equivalen als diferents assajos i anàlisis duts a terme.

#### **3.1. Materials**

Els materials emprats per a la fabricació de les provetes van ser els següents (la fitxa tècnica dels materials que es troben marcats amb un asterisc és pot consultar en l'Annex A) :

1. Metacaolí Peser de ARCIRESA.\*
2. Fum de sílice de ARCIRESA.\*
3. Hidròxid de sodi en lleties de PANREAC.
4. Aigua desionitzada.
5. Desencofrant Sika LN\*.

Degut a que l'efecte de la composició dels materials és molt important en les propietats dels geopolímers s'ha exposat juntament amb algunes característiques a la Taula 1, la Taula 2 i la Taula 3.

Taula 1 Composició de l'hidròxid de sodi.

Composició majoritària	% p/p
NaOH	98,8

Taula 2 Composició i característiques principals del Metacaolí Peser.

Composició majoritària	% p/p
SiO <sub>2</sub>	54,61
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	40,24
Densitat aparent	kg/m <sup>3</sup>
Airejada	600
Compactada	800
Pes específic	g/cm <sup>3</sup>
	2,54

Taula 3 Composició i característiques principals del fum de sílice.

Composició majoritària	% p/p
SiO <sub>2</sub>	93,5
Pes específic	g/cm <sup>3</sup>
	2,25

Pel que fa a les provetes de material compost, a banda dels materials esmentats anteriorment, també s'hi va incorporar fibra vegetal, en aquest cas va ser polpa Kraft de fusta tova (*Pinus insignis*). Algunes de les característiques més rellevants de la fibra les hem recollit en la Taula 4 i la Taula 5, i en la Figura 1 es pot veure una micrografia SEM de la polpa abans d'incorporar-la a la matriu.

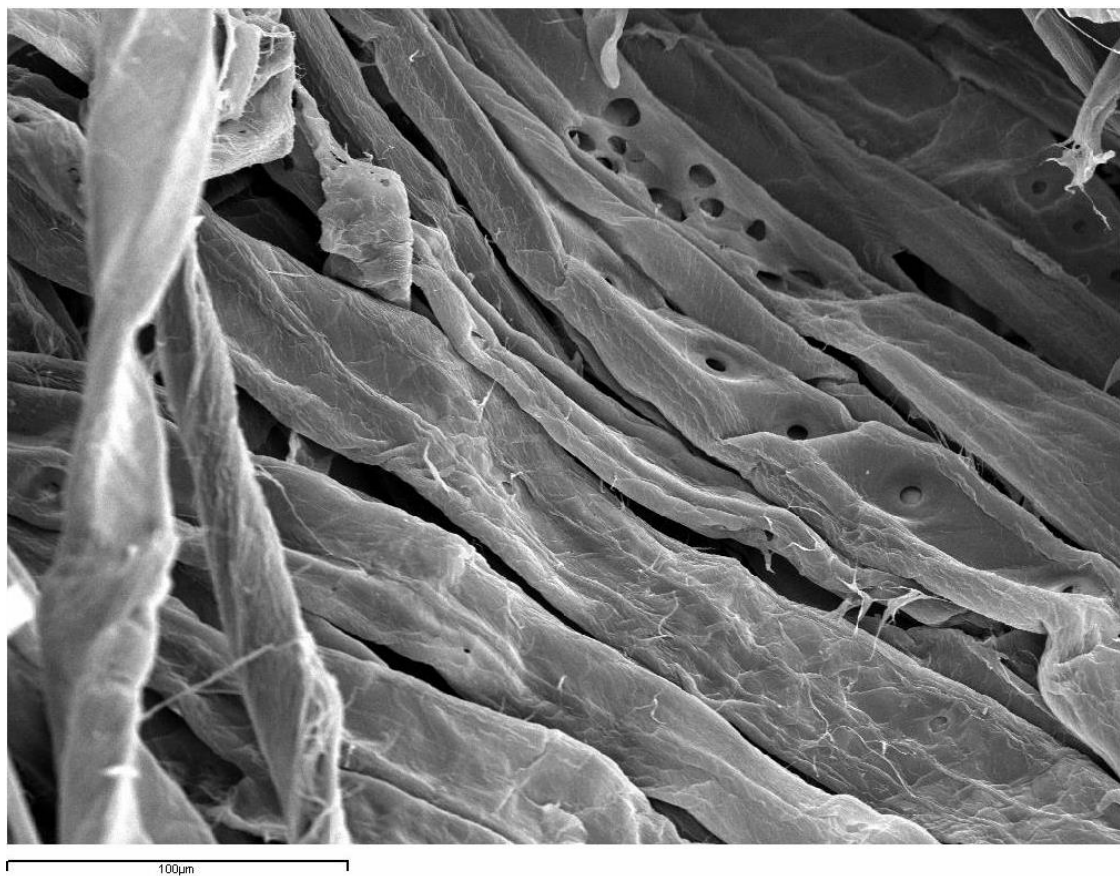


*Taula 4 Característiques morfològiques de la fibra de polpa Kraft utilitzada en la producció del material compost mesurades amb un Kajaani FS300 Analyzer segons la norma ISO 16065-1, sobre una mostra de més de 10000 fibres.*

Llargada mitjana (mm)	1,37
Amplada mitjana (µm)	28,28
Massa lineal (mg/m)	0,256
Índex de curvatura (%)	15,96

*Taula 5 Característiques físiques de la fibra de polpa Kraft utilitzada en la producció del material compost.*

Capacitat de retenció d'aigua (%)	126
Índex de cristallinització (%)	56,8
Viscositat (cm <sup>3</sup> /g)	968



*Figura 1 Micrografia SEM de les fibres de polpa Kraft (Font pròpia).*

## 3.2. Mètodes

### 3.2.1. Estudi de dosificació prèvia de la matriu

En la producció de provetes de matrius sola s'ha seguit, per similitud amb els ciments, la normativa UNE-EN 196-1- *Mètodes d'assaig de cements. Part 1: Determinació de resistències mecàniques*. Els equips emprats tant per a la producció com per a l'assaig de les provetes es troben detallats en el punt 4.4, 4.5, 4.7, 4.8 i 4.9 de la norma. Les indicacions pel que fa a la preparació de les provetes d'assaig es troba en els apartats 7, 8.1 i 8.2 de la norma. El procediment d'assaig s'ha fet segons el punt 9 de la norma (AENOR 2005).

Per tal d'obtenir una matriu amb les millors propietats mecàniques, s'han dissenyat onze dosificacions inicials en les quals s'ha intentat mantenir les proporcions molars més importants en els valors més propers possibles als que, segons la literatura, s'obtenen els resultats més bons. Sobre tot s'ha donat molta importància a mantenir la relació molar Si/Al a un valor molt aproximat a 1.7. De cada dosificació s'han produït tres provetes, les quals s'han deixat madurar a temperatura ambient (20 °C) durant 7 dies. Un cop aquestes provetes han madurat, s'han assajat a flexió i a compressió.

El disseny experimental dels dos assajos amb les dosificacions, les relacions molars, el temps, el tipus de curat i la nomenclatura usada es pot veure en la Taula 6.

Taula 6 Disseny experimental i nomenclatura dels assajos mecànics de l'estudi de dosificació prèvia de la matriu.

Assaig de flexió									
Tipus curat	molar Si/Al	molar Na/Al	molar H <sub>2</sub> O/Na <sub>2</sub> O	pes W/S	MK (g)	FS (g)	NaOH (g)	H <sub>2</sub> O (g)	Nomenclatura
7 dies 20 °C	1,724	0,76	11,76	0,417	900	260	220	575	F1-575
	1,724	0,9	11,25	0,45	900	260	260	650	F1-650
	1,724	1,01	11,25	0,5	900	260	290	725	F1-725
	1,724	1,11	11,25	0,54	900	260	320	800	F1-800
	1,724	1,11	11,95	0,57	900	260	320	850	F1-850
	1,724	1,21	11,25	0,58	900	260	350	875	F1-875
	1,724	1,27	11,71	0,62	900	260	365	950	F1-950

Tipus curat	Assaig a flexió								
	molar Si/Al	molar Na/Al	molar H <sub>2</sub> O/Na <sub>2</sub> O	pes W/S	MK (g)	FS (g)	NaOH (g)	H <sub>2</sub> O (g)	Nomenclatura
7 dies 20 °C	1,724	1,34	11,98	0,66	900	260	385	1025	F1-1025
	1,724	1,46	11,78	0,7	900	260	420	1100	F1-1100
	1,724	1,53	12,01	0,73	900	260	440	1175	F1-1175
	1,724	1,62	12,09	0,77	900	260	465	1250	F1-1250
Assaig de compressió									
Tipus curat	molar Si/Al	molar Na/Al	molar H <sub>2</sub> O/Na <sub>2</sub> O	pes W/S	MK (g)	FS (g)	NaOH (g)	H <sub>2</sub> O (g)	Nomenclatura
7 dies 20 °C	1,724	0,76	11,76	0,417	900	260	220	575	C1-575
									C1-575
	1,724	0,9	11,25	0,45	900	260	260	650	C1-650
									C1-650
	1,724	1,01	11,25	0,5	900	260	290	725	C1-725
									C1-725
	1,724	1,11	11,25	0,54	900	260	320	800	C1-800
									C1-800
	1,724	1,11	11,95	0,57	900	260	320	850	C1-850
									C1-850
	1,724	1,21	11,25	0,58	900	260	350	875	C1-875
									C1-875
	1,724	1,27	11,71	0,62	900	260	365	950	C1-950
									C1-950
	1,724	1,34	11,98	0,66	900	260	385	1025	C1-1025
									C1-1025
	1,724	1,46	11,78	0,7	900	260	420	1100	C1-1100
									C1-1100
	1,724	1,53	12,01	0,73	900	260	440	1175	C1-1175
									C1-1175
1,724	1,62	12,09	0,77	900	260	465	1250	C1-1250	
								C1-1250	

### 3.2.1.1. Fabricació de les provetes

En primer lloc es van dissoldre les lleties de NaOH en l'aigua desionitzada respectant les quantitats calculades per a cada dosificació. A continuació es va pesar el MK i el FS, es van posar els dos materials en un recipient i després s'hi va afegir la dissolució de NaOH. Tot seguit es va amassar la barreja amb la pastadora automàtica.

A continuació es va passar a omplir els motlles i de cadascun dels quals se'n van obtenir 3 provetes iguals, com podeu veure en l'esquema dels motlles en la Figura 2. Prèviament a introduir la mescla en el motlle, es va aplicar una capa de desencofrant per tal de facilitar el procés de desemmotllat.

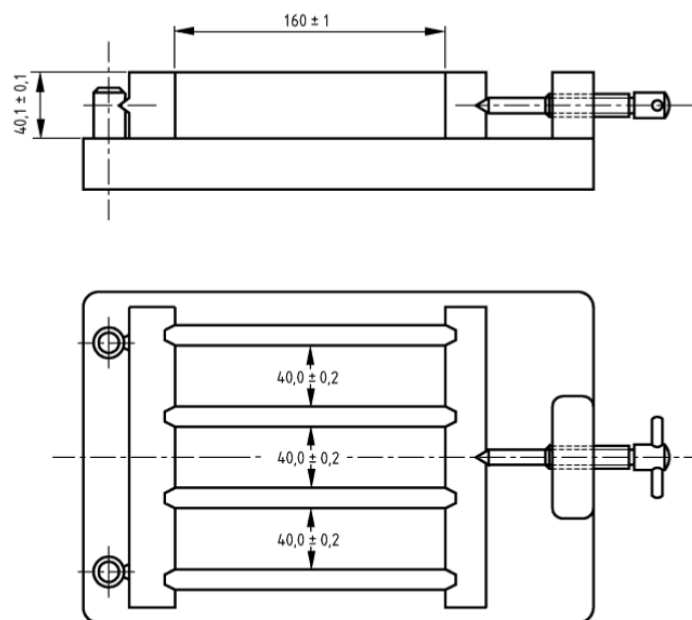


Figura 2 Motlles per a la fabricació de provetes segons la norma UNE-EN 196-1 (AENOR, 2005).

El procediment per omplir-los va ser el següent:

1. Fixar el motlle a la màquina compactadora.
2. Omplir-ne la meitat de manera uniforme mitjançant una espàtula.
3. Compactar la primer capa amb 60 cops de la compactadora.
4. Acabar d'omplir uniformement la part restant del motlle amb l'espàtula.
5. Compactar tota la matriu amb 60 cops més de compactadora.
6. Retirar el motlle de la compactadora.
7. Enrasar la matriu amb una regla específica.

8. Tapar el motlle amb un film de plàstic, ja que és un material que no reacciona amb la mescla.
9. Desemmotllar al cap de 24 hores.
10. Deixar les provetes a temperatura ambient (20 °C) durant 7 dies.

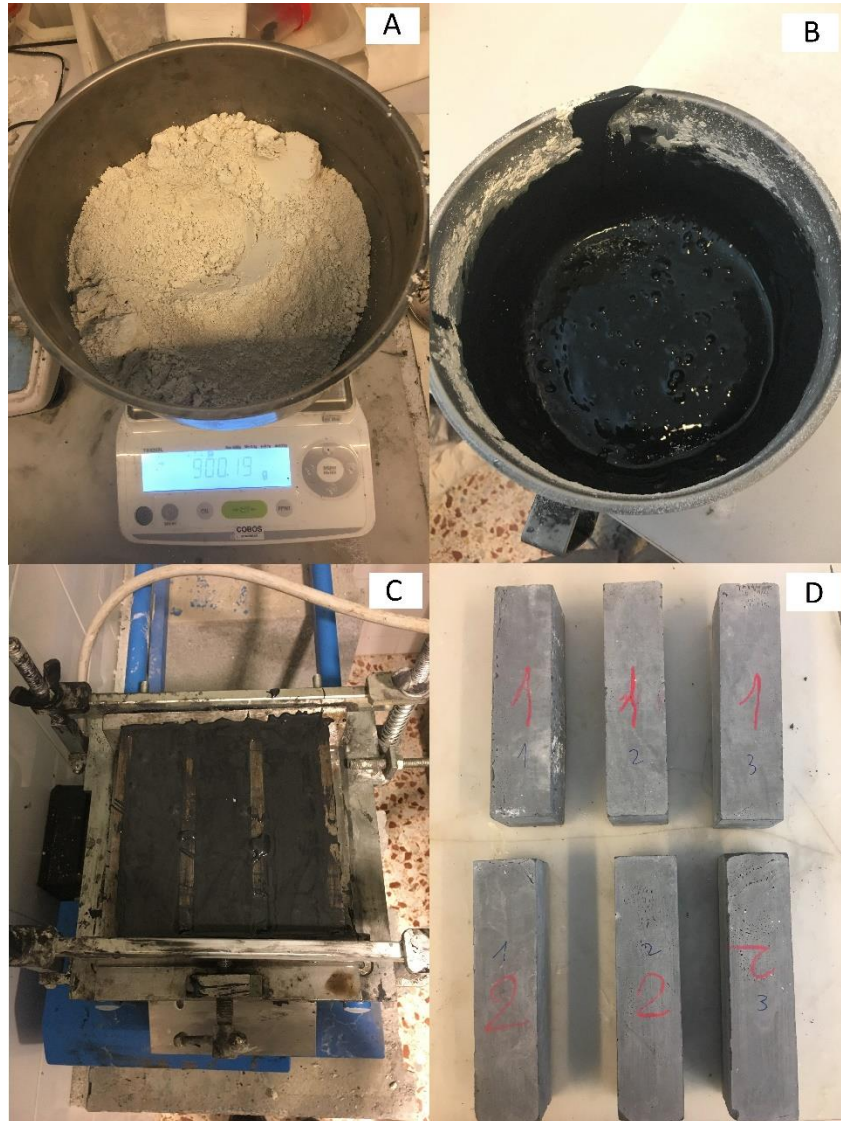


Figura 3 (A) MK abans de ser mesclat; (B) Mescla de geopolímer; (C) Motlle emplenat amb la mescla de geopolímer i col·locat a la compactadora; (D) Provetes desemmotllades (Font pròpia).

#### 3.2.1.2. Assaig mecànic de les provetes

Un cop madurades totes les provetes es va procedir a assajar-les. En primer lloc es van assajar a flexió de tres punts mitjançant la premsa de multi assaig hidràulica Incotècnic. En la Figura 4 es pot veure la col·locació de la proveta en el dispositiu de càrrega i els tres punts que la suporten. De cada proveta assajada a flexió se'n van obtenir dues seccions que posteriorment són les que es van assajar a compressió. En la realització

d'aquest assaig es va configurar la premsa amb una cèl·lula de càrrega de 20 kN, una velocitat de posició de 0,5 mm/min i una precàrrega de 6 kg.

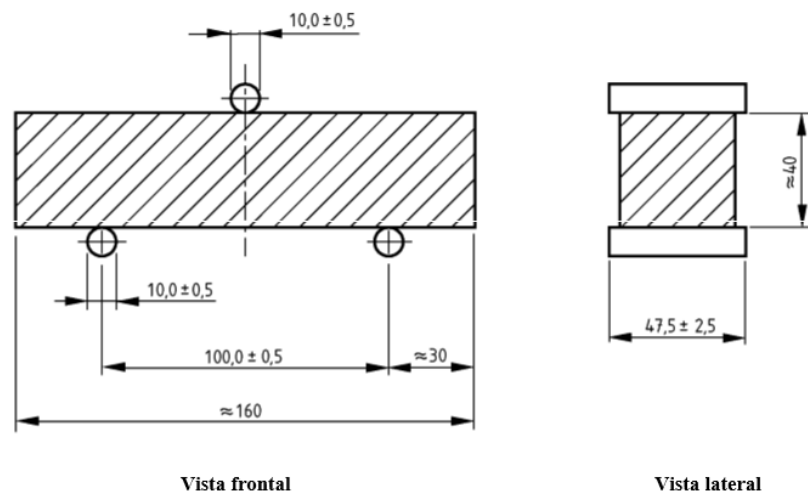


Figura 4 Dispositiu de càrrega per a la determinació de la resistència a flexió (AENOR, 2005).

Per a l'assaig a compressió es va utilitzar un dispositiu de càrrega amb una disposició diferent com veiem en la Figura 5. La cèl·lula de càrrega escollida va ser de 300 kN, la velocitat de posició de 0,5 mm/min i la precàrrega de 6 kg. A partir de les provetes de la cinquena dosificació es va canviar la cèl·lula de càrrega a una de 20 kN ja que la resistència de les provetes ja era massa baixa per continuar utilitzant la de 300 kN.

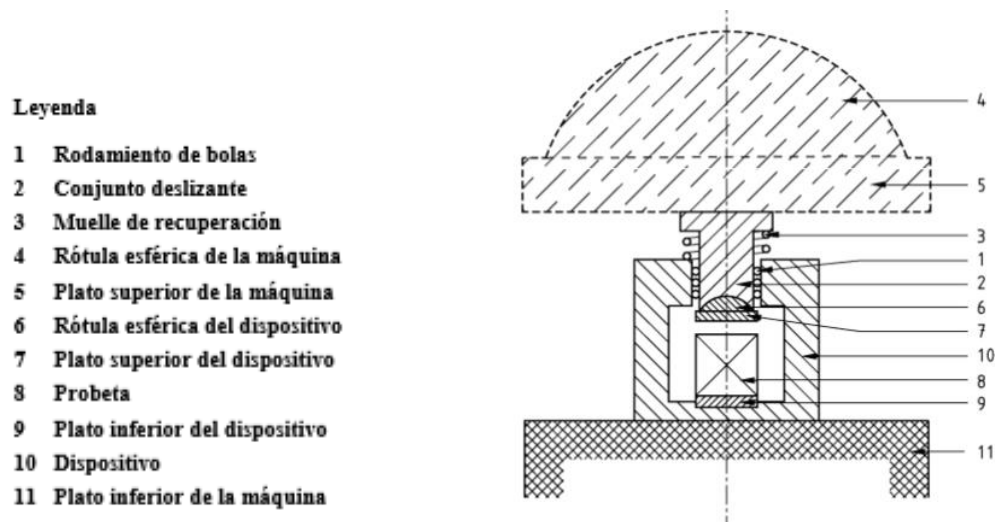


Figura 5 Dispositiu de càrrega per a l'assaig a compressió (AENOR, 2005).

### **3.2.2. Millora de la matriu**

En aquest punt es van introduir alguns canvis que, després de la primera experiència amb les onze dosificacions, es va intuir que podrien millorar el geopolímer, morfològicament i en els resultats als assajos mecànics.

En primer lloc es va decidir seleccionar les tres dosificacions que havien donat millors resultats en el primer experiment. Les millores que es van realitzar en aquestes tres dosificacions van ser a nivell de procés de producció. Principalment es va decidir moldre el FS en un molí de boles durant dos minuts i mig per tal de reduir la mida de partícula i fer que la reacció de geopolimerització dels diferents elements fos més completa pel fet d'haver augmentat la superfície de contacte entre materials. La segona modificació del procés que es va introduir en aquest segon experiment, va ser el fet de preparar el dia anterior a la producció de les provetes la dissolució d'hidròxid de sodi i afegir-li a aquesta el FS molt, de tal manera que el dia següent, en el moment de preparar la massa, es pesava el MK, se li afegia la solució preparada el dia anterior i es mesclava amb la pastadora automàtica. En primer lloc aquest últim canvi es va fer perquè la dissolució d'hidròxid de sodi amb aigua allibera calor durant força estona i aquesta temperatura no va semblar favorable per a la reacció de polimerització i per tant deixar-ho en repòs durant 24 hores va fer que disminuís i s'estabilitzés la temperatura, de manera que a l'hora de fer la mescla estava a temperatura ambient (20 °C). En segon lloc el fet de mesclar aquets productes amb anterioritat permet obtenir un activador alcalí molt més cohesionat i per tant amb més capacitat de dissoldre les molècules d'aluminosilicat que trobem en el metacaolí per a que es puguin donar les reaccions de geopolimerització.

Per tal de comprovar si realment aquests canvis milloraven la matriu de geopolímer es va dissenyar un segon experiment que es pot veure en la Taula 7.

Taula 7 Disseny experimental i nomenclatura dels assajos mecànics de la primera millora de la matriu.

Assaig de flexió									
Tipus curat	molar Si/Al	molar Na/Al	molar H <sub>2</sub> O/Na <sub>2</sub> O	pes W/S	MK (g)	FS (g)	NaOH (g)	H <sub>2</sub> O (g)	Proveta 1
7 dies 20 °C	1,724	0,76	11,76	0,417	900	260	220	575	F2-575-2,5'
	1,724	0,9	11,25	0,45	900	260	260	650	F2-650-2,5'
	1,724	1,01	11,25	0,5	900	260	290	725	F2-725-2,5'
Assaig de compressió									
Tipus curat	molar Si/Al	molar Na/Al	molar H <sub>2</sub> O/Na <sub>2</sub> O	pes W/S	MK (g)	FS (g)	NaOH (g)	H <sub>2</sub> O (g)	Proveta 1
7 dies 20 °C	1,724	0,76	11,76	0,417	900	260	220	575	C2-575-2,5'
									C2-575-2,5'
	1,724	0,9	11,25	0,45	900	260	260	650	C2-650-2,5'
									C2-650-2,5'
	1,724	1,01	11,25	0,5	900	260	290	725	C2-725-2,5'
									C2-725-2,5'

Els materials utilitzats, la producció de les provetes i l'assaig mecànic es va realitzar de la mateixa manera que s'ha esmentat en l'apartat 3.1. i 3.2.1, l'únic que va diferir va ser el fet de moldre el FS durant dos minuts i mig, i barrejar-lo amb la dissolució de NaOH prèviament.

Un cop assajades les provetes del segon experiment, encara es va voler introduir un tercer canvi per millorar la matriu. Aquest canvi va consistir simplement en augmentar el temps de molturat del FS fins a cinc minuts. Per a observar les millores produïdes per aquesta modificació es va realitzar un tercer experiment formulat en la Taula 8.



Taula 8 Disseny experimental i nomenclatura dels assajos mecànics de la segona millora de la matriu.

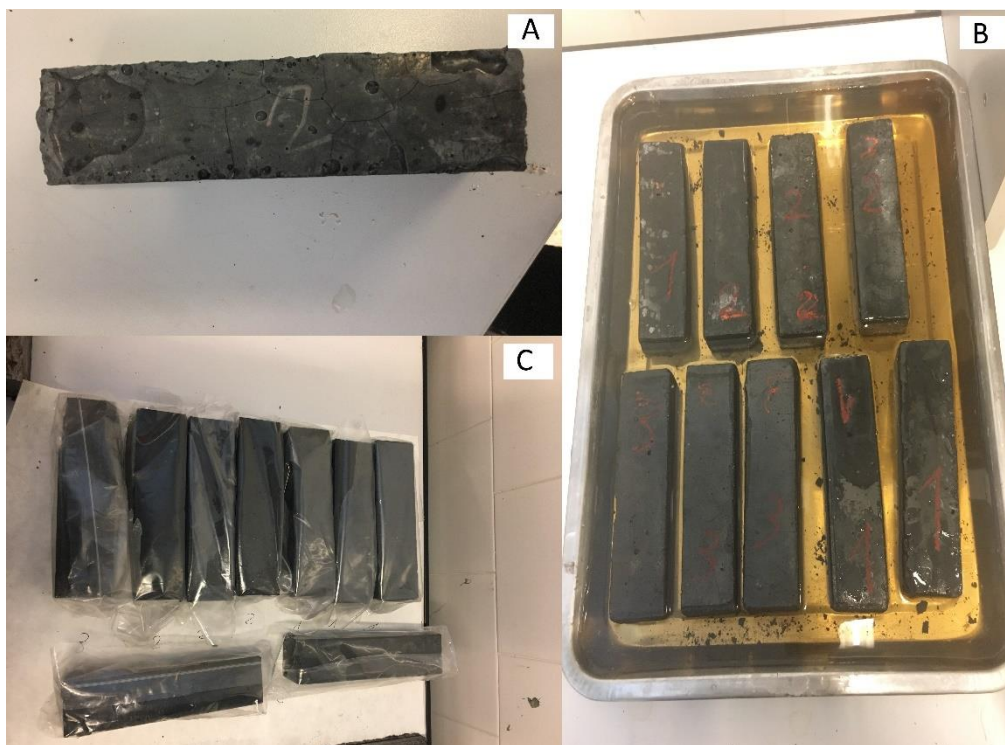
Assaig de flexió									
Tipus curat	molar Si/Al	molar Na/Al	molar H <sub>2</sub> O/Na <sub>2</sub> O	pes W/S	MK (g)	FS (g)	NaOH (g)	H <sub>2</sub> O (g)	Nomenclatura
7 dies 20 °C	1,724	0,76	11,76	0,417	900	260	220	575	F3-575-5'
	1,724	0,9	11,25	0,45	900	260	260	650	F3-650-5'
	1,724	1,01	11,25	0,5	900	260	290	725	F3-725-5'
Assaig de compressió									
Tipus curat	molar Si/Al	molar Na/Al	molar H <sub>2</sub> O/Na <sub>2</sub> O	pes W/S	MK (g)	FS (g)	NaOH (g)	H <sub>2</sub> O (g)	Nomenclatura
7 dies 20 °C	1,724	0,76	11,76	0,417	900	260	220	575	C3-575-5'
									C3-575-5'
	1,724	0,9	11,25	0,45	900	260	260	650	C3-650-5'
									C3-650-5'
	1,724	1,01	11,25	0,5	900	260	290	725	C3-725-5'
									C3-725-5'

Els materials utilitzats en aquest tercer experiment, així com la producció de les provetes i l'assaig mecànic van ser realitzats de la mateixa manera que en el primer experiment, introduint els canvis del segon experiment i variant únicament el temps de molturat, que en el segon experiment va ser de dos minuts i mig i en aquest tercer experiment va ser de cinc minuts.

### 3.2.3. Caracterització de les matrius definitives

Com que els resultats del tercer experiment van ser molt positius, es va decidir que aquest procés de producció seria el definitiu. L'estudi de les matrius definitives es va dur a terme amb els mateixos materials, la mateixa forma de produir les provetes i la mateixa manera d'assajar que en el tercer experiment. Pel que fa al mètode de curat se'n van fer de dos tipus diferents que consistien en 7 dies a temperatura ambient (20 °C) o 7 dies a l'estufa a 60 °C. Cal remarcar que, com que en el tercer experiment es van

observar esquerdes superficials en les provetes, en aquest cas es van recobrir amb un film de plàstic aquelles curades a temperatura ambient i es van introduir amb el motlle a l'estufa amb un film de plàstic que el cobria per la part superior les que s'havien de curar a 60 °C. Finalment, de les provetes madurades, se'n van destinar la meitat de cada tipus de curat a un procés de 25 cicles d'assecat-humitejat, d'un dia de durada cada cicle, realitzat manualment, de manera que durant el dia es posaven les provetes a l'estufa a 60 °C i durant la nit es mantenien en safates plenes d'aigua. El disseny experimental de l'experiment de les matrius definitives el podem veure en la Taula 9.



*Figura 6 (A) Proveta amb la superfície esquerdada; (B) Provetes sotmeses a cicles assecat-humitejat en remull; (C) Provetes cobertes amb film de plàstic per que no s'esquerdin (Font pròpia).*

*Taula 9 Disseny experimental i nomenclatura dels assajos mecànics de la matriu definitiva.*

Assaig de flexió									
Tipus curat	molar Si/Al	molar Na/Al	molar H <sub>2</sub> O/Na <sub>2</sub> O	pes W/S	MK (g)	FS (g)	NaOH (g)	H <sub>2</sub> O (g)	Nomenclatura
7 dies 20 °C Cicle	1,724	0,76	11,76	0,417	900	260	220	575	FM575-20C
7 dies 60 °C Cicle	1,724	0,76	11,76	0,417	900	260	220	575	FM575-60C
7 dies 20 °C No Cicle	1,724	0,76	11,76	0,417	900	260	220	575	FM575-20N
7 dies 60 °C No Cicle	1,724	0,76	11,76	0,417	900	260	220	575	FM575-60N
7 dies 20 °C Cicle	1,724	0,9	11,25	0,45	900	260	260	650	FM650-20C
7 dies 60 °C Cicle	1,724	0,9	11,25	0,45	900	260	260	650	FM650-60C
7 dies 20 °C No Cicle	1,724	0,9	11,25	0,45	900	260	260	650	FM650-20N
7 dies 60 °C No Cicle	1,724	0,9	11,25	0,45	900	260	260	650	FM650-60N
7 dies 20 °C Cicle	1,724	1,01	11,25	0,5	900	260	290	725	FM725-20C
7 dies 60 °C Cicle	1,724	1,01	11,25	0,5	900	260	290	725	FM725-60C
7 dies 20 °C No Cicle	1,724	1,01	11,25	0,5	900	260	290	725	FM725-20N
7 dies 60 °C No Cicle	1,724	1,01	11,25	0,5	900	260	290	725	FM725-60N
Assaig de compressió									
Tipus curat	molar Si/Al	molar Na/Al	molar H <sub>2</sub> O/Na <sub>2</sub> O	pes W/S	MK (g)	FS (g)	NaOH (g)	H <sub>2</sub> O (g)	Nomenclatura
7 dies 20 °C Cicle	1,724	0,76	11,76	0,417	900	260	220	575	CM575-20C
									CM575-20C
7 dies 60 °C Cicle	1,724	0,76	11,76	0,417	900	260	220	575	CM575-60C
									CM575-60C
7 dies 20 °C No Cicle	1,724	0,76	11,76	0,417	900	260	220	575	CM575-20N
									CM575-20N
7 dies 60 °C No Cicle	1,724	0,76	11,76	0,417	900	260	220	575	CM575-60N
									CM575-60N

Assaig de compressió									
Tipus curat	molar Si/Al	molar Na/Al	molar H <sub>2</sub> O/Na <sub>2</sub> O	pes W/S	MK (g)	FS (g)	NaOH (g)	H <sub>2</sub> O (g)	Nomenclatura
7 dies 20 °C Cicle	1,724	0,9	11,25	0,45	900	260	260	650	CM650-20C
									CM650-20C
7 dies 60 °C Cicle	1,724	0,9	11,25	0,45	900	260	260	650	CM650-60C
									CM650-60C
7 dies 20 °C No Cicle	1,724	0,9	11,25	0,45	900	260	260	650	CM650-20N
									CM650-20N
7 dies 60 °C No Cicle	1,724	0,9	11,25	0,45	900	260	260	650	CM650-60N
									CM650-60N
7 dies 20 °C Cicle	1,724	1,01	11,25	0,5	900	260	290	725	CM725-20C
									CM725-20C
7 dies 60 °C Cicle	1,724	1,01	11,25	0,5	900	260	290	725	CM725-60C
									CM725-60C
7 dies 20 °C No Cicle	1,724	1,01	11,25	0,5	900	260	290	725	CM725-20N
									CM725-20N
7 dies 60 °C No Cicle	1,724	1,01	11,25	0,5	900	260	290	725	CM725-60N
									CM725-60N

### 3.2.4. Caracterització del material compost

En la producció de les provetes de material compost s'ha seguit, com en la matriu sola, la normativa UNE-EN 196-1- *Mètodes d'assaig de ciments. Part 1: Determinació de resistències mecàniques*, en els mateixos apartats que s'han esmentat per a les matrius soles. El que ha diferit és que en aquest cas no s'ha compactat amb la compactadora com la norma explica en el punt 4.6, si no que al final s'ha compactat amb una premsa amb la que s'hi ha aplicat 2.5 tones de pes.

Pel que fa a la caracterització del material compost s'ha seguit la normativa UNE-EN 12467-*Plaques planes de ciment reforçades amb fibres. Especificacions del producte i mètodes d'assaig*. S'ha seguit en el punt 7.2.3.2. on descriu la mesura de les provetes, s'han sotmès a cicles sec-humit segons el punt 7.3.6. i finalment l'assaig a flexió s'ha dut

a terme com es detalla en l'apartat 7.3.2.3. (AENOR 2013). Pel que fa a l'assaig a compressió, normalment no es du a terme en les provetes de material compost i per això la norma específica d'aquestes no ho recull, per tant hem seguit la metodologia especificada en la UNE-EN 196-1- *Mètodes d'assaig de ciments. Part 1: Determinació de resistències mecàniques*, encara que les provetes són més primes (AENOR 2005).

Per tal de veure si el fet d'introduir fibres vegetals en la matriu produïa millores en les provetes a nivell mecànic i comprovar la durabilitat d'aquestes en el material compost, es va dissenyar un últim experiment que es pot veure en Taula 10. De les provetes de material compost, de la mateixa manera que s'ha fet en les provetes definitives de matriu sola, se'n van curar la meitat a temperatura ambient (20 °C) i l'altra meitat a l'estufa a 60 °C i, de cada tipus de curat, la meitat es van sotmetre a un procés de 25 cicles d'assecat-humitejat, d'un dia de durada cada cicle, fets manualment.

Taula 10 Disseny experimental i nomenclatura dels assajos mecànics del material compost.

Assaig de flexió										
Tipus curat	molar Si/Al	molar Na/Al	molar H <sub>2</sub> O/Na <sub>2</sub> O	pes W/S	MK (g)	FS (g)	NaOH (g)	H <sub>2</sub> O (g)	Fibra (g)	Nomenclatura
7 dies 20 °C Cicle	1,724	0,76	11,76	0,417	315	91	77	201,25	126,32	FF575-20C
7 dies 60 °C Cicle	1,724	0,76	11,76	0,417	315	91	77	201,25	126,32	FF575-60C
7 dies 20 °C No Cicle	1,724	0,76	11,76	0,417	315	91	77	201,25	126,32	FF575-20N
7 dies 60 °C No Cicle	1,724	0,76	11,76	0,417	315	91	77	201,25	126,32	FF575-60N
7 dies 20 °C Cicle	1,724	0,9	11,25	0,45	315	91	91	227,5	133,75	FF650-20C
7 dies 60 °C Cicle	1,724	0,9	11,25	0,45	315	91	91	227,5	133,75	FF650-60C
7 dies 20 °C No Cicle	1,724	0,9	11,25	0,45	315	91	91	227,5	133,75	FF650-20N
7 dies 60 °C No Cicle	1,724	0,9	11,25	0,45	315	91	91	227,5	133,75	FF650-60N
7 dies 20 °C Cicle	1,724	1,01	11,25	0,5	315	91	101,5	253,75	140,54	FF725-20C



Assaig de compressió										
Tipus curat	molar Si/Al	molar Na/Al	molar H <sub>2</sub> O/Na <sub>2</sub> O	pes W/S	MK (g)	FS (g)	NaOH (g)	H <sub>2</sub> O (g)	Fibra (g)	Nomenclatura
7 dies 60 °C No Cicle	1,724	1,01	11,25	0,5	315	91	101,5	253,75	140,54	CF725-60N
										CF725-60N

Pel que fa als materials que es van utilitzar en la producció de les provetes de material compost, van ser els mateixos utilitzats per produir les provetes de les matrius de geopolímer soles però s'hi va afegir un 5 % en pes de fibra expressat com a fibra seca.

El procés de producció de la mescla de geopolímer va ser dut a terme igual que en les matrius definitives però afegint-hi la fibra. El punt en que va diferir el procés de producció de provetes, va ser en l'emplenat del motlle.

Prèviament a introduir la mescla en el motlle, es va aplicar una capa de desencofrant per tal de facilitar el procés de desemmotllat. El procediment per omplir-los va ser el següent:

1. Dividir la massa en tres parts iguals, pesant-ho amb una balança.
2. Posar cadascuna de les tres parts de la mescla en un dels tres espais del motlle.
3. Manualment i amb l'ajuda d'una espàtula intentar que les provetes quedessin el més regulars possibles.
4. Col·locar en el motlle les peces necessàries per a posar-ho a comprimir amb una premsa manual.
5. Posar a comprimir a la premsa amb 2.5 tones de pressió durant una hora.
6. Treure el motlle de la premsa i en el cas de curat a 60 °C introduir immediatament els motlles a l'estufa durant 7 dies. Pel que fa als curats en ambient, deixar amb el motlle durant 7 dies a 20 °C.



Figura 7 (A) Material compost en el motlle comprimit per la premsa manual; (B) Provetes de material compost desemmotllades; (C) Provetes a l'estufa; (D) Provetes sotmeses a cicles d'assecat-humitejat en remull (Font pròpia).

Finalment es va procedir a assajar mecànicament a flexió i a compressió les provetes, de la mateixa manera que en les provetes de matriu sola, però utilitzant a flexió la cèl·lula de càrrega de 3 kN, la velocitat de posició de 0,4 mm/min i la precàrrega de 6 kg i a compressió la cèl·lula de càrrega de 20 kN, la velocitat de posició de 0,4 mm/min i la precàrrega de 6 kg.

### 3.3. Microestructura i anàlisi química de la matriu

#### 3.3.1. Difracció de Raig X (DRX)

Per tal d'obtenir informació sobre la composició de la matriu i per conèixer un paràmetre important com és la quantitat de MK que queda sense reaccionar a cada proveta de matriu sola segons la dosificació i tipus de curat, s'ha realitzat una anàlisi de difracció de Raig X (DRX). L'aparell emprat ha estat un difractòmetre model XPert PRO MPD DY-3197 (PANalytical, Netherlands).



### **3.3.2. Anàlisi termogravimètrica (TGA)**

En aquesta anàlisi s'ha estudiat quina és la pèrdua de material en front l'augment de temperatura sobre fragments de provetes de matriu sola segons les diferents dosificacions i tipus de curat. L'aparell que ha permès aquest exploració ha estat el TGA 2 de Mettler Toledo.

### **3.3.3. Espectroscòpia d'infrarojos per transformada de Fourier (FTIR)**

Mitjançant l'espectroscòpia FTIR s'ha analitzat la composició molecular de la matriu de geopolímer segons les varies dosificacions i tipus de curat, ja que les diferents estructures químiques (molècules) produeixen distintes empremtes espectrals. Per dur aquesta anàlisi a terme s'ha emprat un espectròmetre FTIR model Nicolet 6700 utilitzant un adaptador de model ATR Smart Orbit (amb un disc de diamant).

### **3.3.4. Microscòpia electrònica (SEM BSE)**

Gràcies a la microscòpia electrònica hem pogut observar la microestructura així com també hem pogut conèixer la composició de les provetes de material compost segons les diferents dosificacions i tipus de curat. Aquestes imatges i dades s'han obtingut, per a les provetes de la dosificació amb un contingut d'aigua de 575 ml, amb un microscopi electrònic que disposa d'un detector d'electrons retrodispersats (BSE) model JSM-6300 (JEOL, Japan), equipat amb un espectròmetre de dispersió d'energia radiogràfica (EDS) model Link ISIS-200 (Oxford Instruments, United Kingdom). El microscopi que acabem d'anomenar va sofrir problemes aliens a nosaltres i vam continuar estudiant les demés provetes amb un microscopi electrònic de feix de llums focalitzats model Zeiss Neon40 amb doble columna iònica i electrònica per observació, tall selectiu, disposició de capes, tomografia tridimensional, preparació de mostres TEM, micro-fabricació i anàlisi elemental, que també funciona com a BSE SEM.

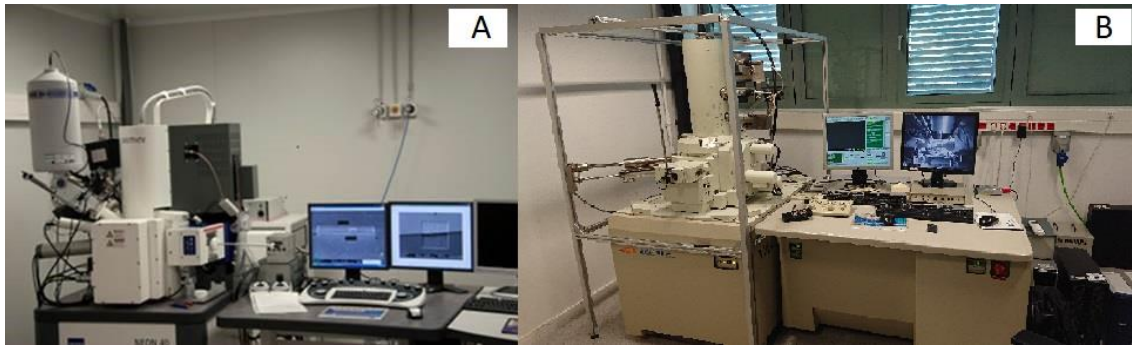


Figura 8 (A) Microscopi electrònic de feix de llums focalitzats (SEM); (B) Microscopi electrònic amb detector d'electrons retrodispersats (SEM BSE) (Font pròpia).

### 3.4. Durabilitat de les fibres

#### 3.4.1. Microscòpia electrònica (SEM)

Per tal d'observar la durabilitat de les fibres al procés dels 25 cicles d'assecat-humitejat, s'ha observat una mostra de material compost que no ha passat pel procés de cicles i una que si que hi ha passat, corresponents a la dosificació de 575 ml d'aigua, amb un microscopi electrònic amb detector d'electrons secundaris model JOEL JSM-5610.



Figura 9 Microscopi electrònic amb detector d'electrons secundaris (SEM) (Font pròpia).

## 4. Anàlisi de resultats

Tots els resultats provinents dels mètodes descrits anteriorment es mostraran i s'analitzaran en aquest apartat de l'estudi.

### 4.1. Assajos mecànics

Els resultats dels assajos mecànics de les provetes de matriu sola i de material compost s'expressen segons l'apartat 10 de la norma UNE-EN 196-1, exceptuant en el cas del MOE que el mètode és propi i està basant en les recomanacions de l'organització *International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures (RILEM)* publicades en el TFR1 (International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials 1984).

D'assajos mecànics, i com s'ha esmentat en apartats anteriors, se n'ha realitzat de dos tipus a cada proveta: flexió i compressió.

Per cada proveta assajada s'han obtingut una sèrie de dades que fan referència a la força que s'ha aplicat (a flexió o a compressió) expressada en kN i al desplaçament realitzat pel suport mòbil fins a arribar al trencament de la proveta, expressat en mil·límetres.

Per tal de comparar i poder realitzar els càlculs posteriors adients, s'han necessitat els resultats expressats com a tensió aplicada a la proveta en MPa (N/mm<sup>2</sup>) en funció del desplaçament fet per la premsa. Aquests valors s'han obtingut mitjançant l'equació 1 en el cas de l'assaig a flexió i l'equació 2 en el cas de l'assaig a compressió.

$$Tensió = \frac{3 * Força aplicada a la proveta (N) * Longitud proveta (mm)}{2 * Amplada proveta (mm) * Gruix proveta (mm)^2} = \frac{N}{mm^2} = MPa [1]$$

$$Tensió = \frac{Força aplicada a la proveta (N)}{Àrea proveta (mm)^2} = \frac{N}{mm^2} = MPa [2]$$

Un cop transformats els valors de força a valors de tensió en MPa, s'ha buscat el valor del punt de ruptura de la proveta (MOR) mitjançant la realització de gràfiques on s'observa la tensió (MPa) en front al desplaçament (mm), tant per a flexió com per a compressió. Per tal d'analitzar de forma més senzilla les dades registrades per la premsa, s'han hagut d'eliminar els valors repetits o molt pròxims. En la Figura 10 podem observar

el tipus de gràfica que és genera segons si s'està assajant provetes de material compost (a) o provetes de matriu sola (b). Es pot veure que en la gràfica de la matriu sola un cop superat el MOR la tensió aplicada disminueix dràsticament, això significa que passat el punt de ruptura la proveta està trencada completament i no pot assumir cap nivell de tensió. Pel que fa a la gràfica del material compost, podem veure que un cop superat el MOR la tensió va disminuint progressivament de tal manera que encara que s'hagi trencat el material, pot suportar certa tensió durant un temps, i això és degut a la resistència al trencament aportada per les fibres vegetals.

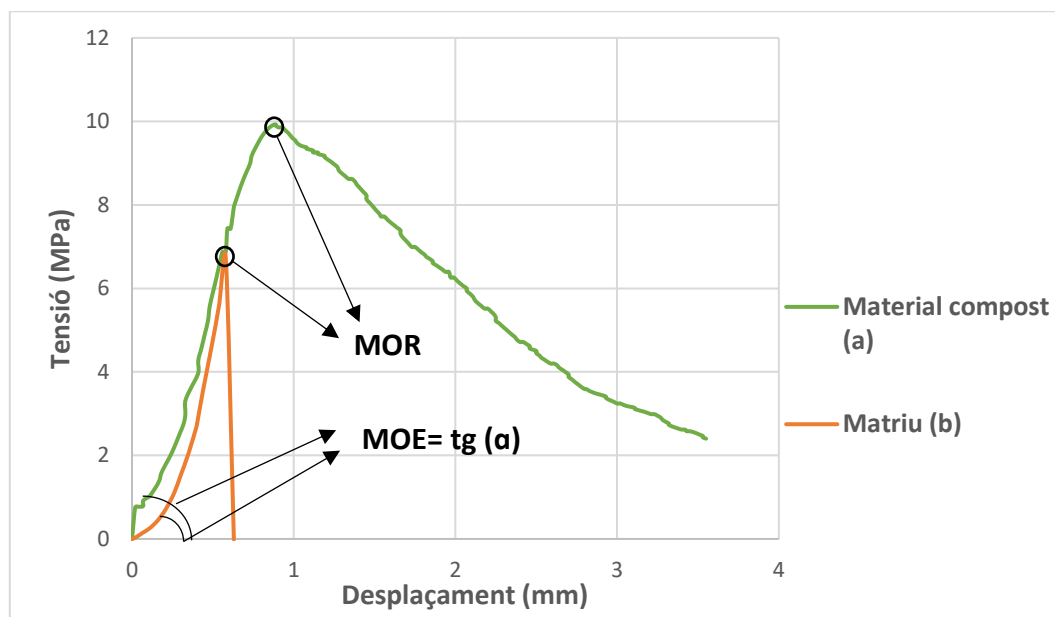


Figura 10 Tipologia de gràfica segons si la proveta és de material compost (a) o de matriu sola (b).

Pel que fa el mòdul d'elasticitat (MOE), consisteix en la relació entre la força i la deformació i serveix com a indicatiu per determinar la rigidesa d'un material, com més elevat és el MOE més rígid és el material i viceversa. A l'hora de fer el seu càlcul molts materials no disposen d'una pendent ben definida ja que hi ha imperfeccions, tant en els equips com en el propi material que fan que el tram elàstic no sigui una recta perfecta. Existeixen diferents maneres de determinar el valor del MOE en un material on la corba no està perfectament definida. En el cas de la norma UNE-EN-12467 es tria un segment de la corba que l'operador considera que defineix millor el comportament del material. En el nostre cas farem una versió millorada d'aquest mètode, consistent a trobar la inclinació de la recta de regressió d'un tram de la corba que es considera que defineix millor el comportament del material com per exemple observem en Figura 11.

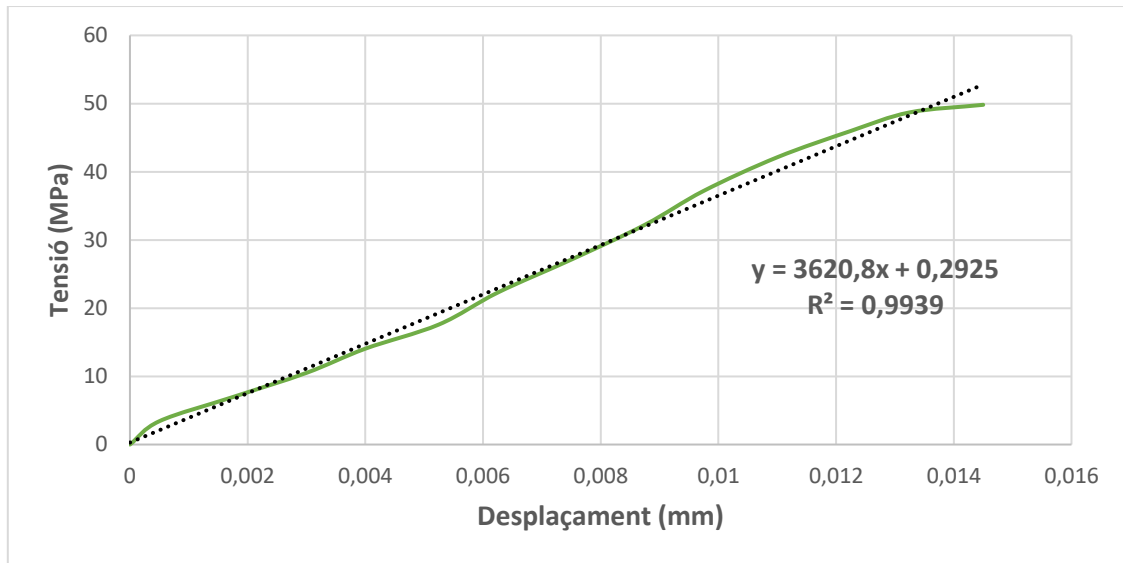


Figura 11 Exemple d'una recta de regressió generada per al càlcul del mòdul d'elasticitat (MOE).

Finalment, pel que fa al càlcul de l'energia específica consisteix en la suma de l'energia que necessita la premsa per trencar la peça, per unitat de superfície de la secció, com es pot observar en l'equació 3.

$$\text{Energia específica} = \frac{\sum(\text{Força aplicada a la proveta (N)} * \text{Desplaçament (mm)})}{\text{Àrea de la secció (m}^2\text{)}} = \frac{\text{kJ}}{\text{m}^2} \quad [3]$$

#### 4.1.1. Resultats de l'estudi de la dosificació prèvia de la matriu

En aquest apartat s'analitzaran els resultats de les provetes descrites en el punt 3.2.1.

#### 4.1.1.1. Resultats de l'assaig a flexió

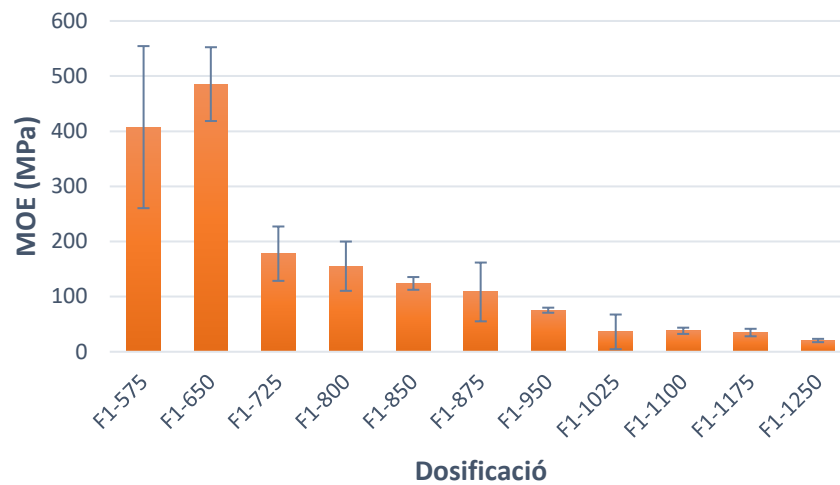


Figura 12 Resultat del càlcul del Mòdul d'elasticitat (MOE) de cada una de les dosificacions, de l'estudi de la dosificació prèvia, calculat a partir de 3 mostres assajades a flexió en les mateixes condicions. La barra d'error correspon a la desviació estàndard.

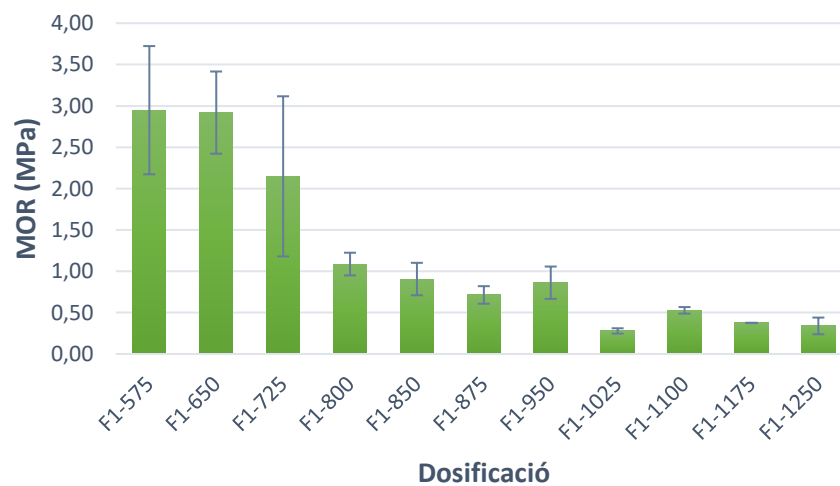


Figura 13 Resultat del càlcul del Punt de ruptura (MOR) de cada una de les dosificacions, de l'estudi de la dosificació prèvia, calculat a partir de 3 mostres assajades a flexió en les mateixes condicions. La barra d'error correspon a la desviació estàndard.

En la Figura 12 i la Figura 13 podem observar que, a mesura que augmentem la quantitat d'aigua i la quantitat de NaOH en la dosificació de la matriu de geopolímer, disminueix tant la resistència a flexió com també la rigidesa del material. Tot i això, entre la dosificació que conté 575 ml d'aigua i la que conté 650 ml d'aigua no hi observem cap diferència notable, i inclús podríem dir que a flexió la resistència de la segona dosificació dona millors resultats que la primera.

## 4.1.1.2. Resultats de l'assaig a compressió

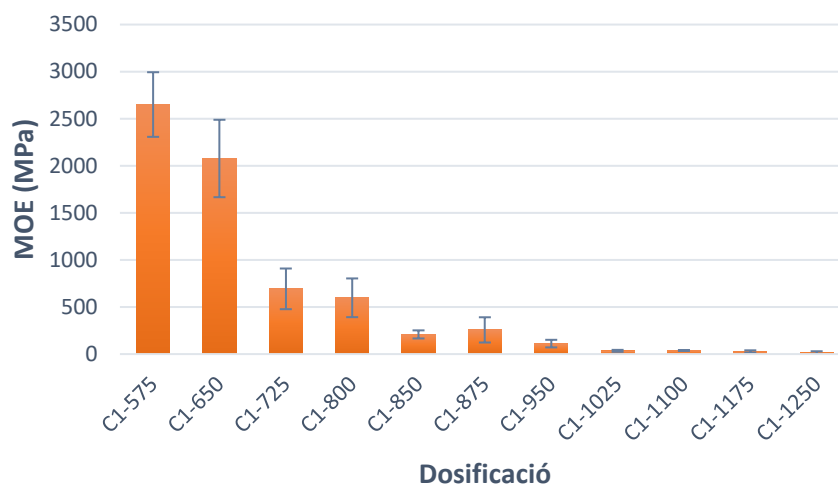


Figura 14 Resultat del càlcul del Mòdul d'elasticitat (MOE) de cada una de les dosificacions, de l'estudi de la dosificació prèvia, calculat a partir de 3 mostres assajades a compressió en les mateixes condicions. La barra d'error correspon a la desviació estàndard.

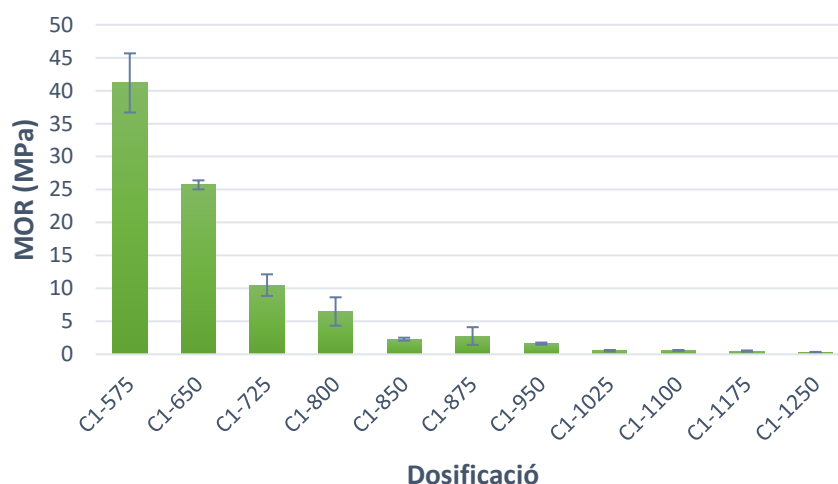


Figura 15 Resultat del càlcul del Punt de ruptura (MOR) de cada una de les dosificacions, de l'estudi de la dosificació prèvia, calculat a partir de 3 mostres assajades a compressió en les mateixes condicions. La barra d'error correspon a la desviació estàndard.

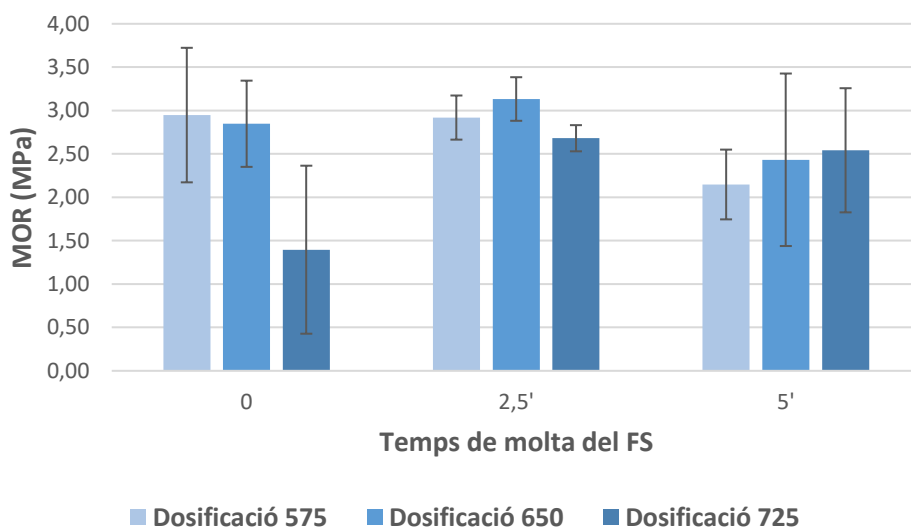
Pel que fa als resultats a compressió de les onze dosificacions inicials, clarament es pot veure en la Figura 14 i la Figura 15 la disminució progressiva de la resistència i de la rigidesa a mesura que s'ha augmentat el contingut d'aigua i de NaOH en les matrius. El fet d'augmentar la quantitat de solució alcalina, tot i permetre mantenir la relació molar Si/Al amb un valor constant en totes les dosificacions, ha provocat un augment progressiu dels valors de les proporcions molars Na/Al, H<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O i la relació en pes W/S. Com ja s'ha esmentat a la introducció, la relació Si/Al és la més important a mantenir i

ha de ser molt pròxima a 1.7, en aquest apartat hem pogut comprovar que els valors de les altres proporcions també són de gran importància i que, segons les dosificacions amb millors resultats, s'haurien de trobar entre 0.76-0.9 en el cas del Na/Al, entre 11.25-11.8 en el cas de  $H_2O/Na_2O$  i entre 0.4-0.45 en el cas de W/S.

#### 4.1.2. Resultats de la millora de la matriu

En aquest apartat s'analitzaran els resultats de les provetes descrites en el punt 3.2.2.

##### 4.1.2.1. Resultats de l'assaig a flexió



*Figura 16 Resultat del càlcul del Punt de ruptura (MOR) de cada una de les dosificacions i cada temps de molturat del FS, de la millora de la matriu, calculat a partir de 3 mostres assajades a flexió en les mateixes condicions. La barra d'error correspon a la desviació estàndard.*



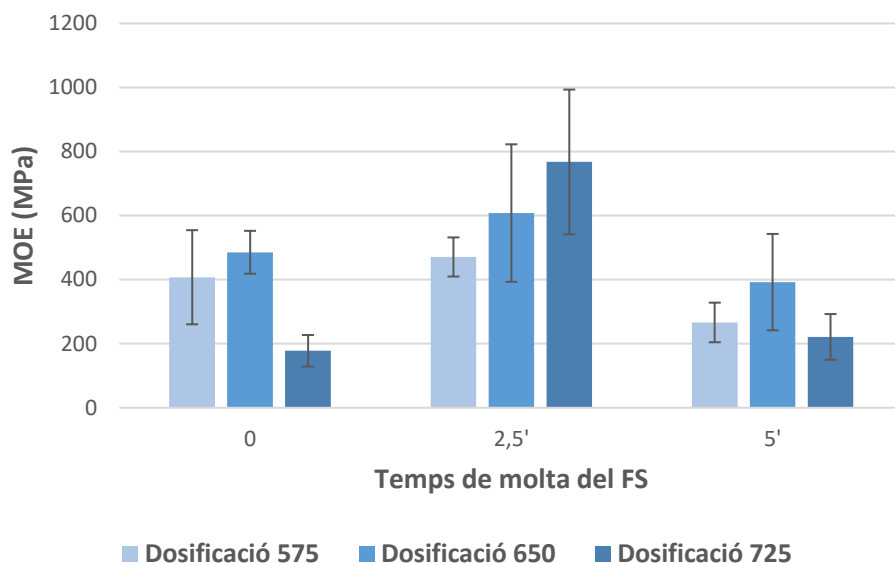


Figura 17 Resultat del càlcul del Mòdul d'elasticitat (MOE) de cada una de les dosificacions i cada temps de molturat del FS, de la millora de la matriu, calculat a partir de 3 mostres assajades a flexió en les mateixes condicions. La barra d'error correspon a la desviació estàndard.

En les gràfiques que veiem en la Figura 16 i la Figura 17 s'han comparat els resultats de resistència i rigidesa a flexió de la matriu en funció de la dosificació i el temps de molta del FS. Tan pel que fa a la resistència com a la rigidesa no s'observa cap tendència que ens permeti deduir si la millora introduïda ha resultat favorable.

#### 4.1.2.2. Resultats de l'assaig a compressió

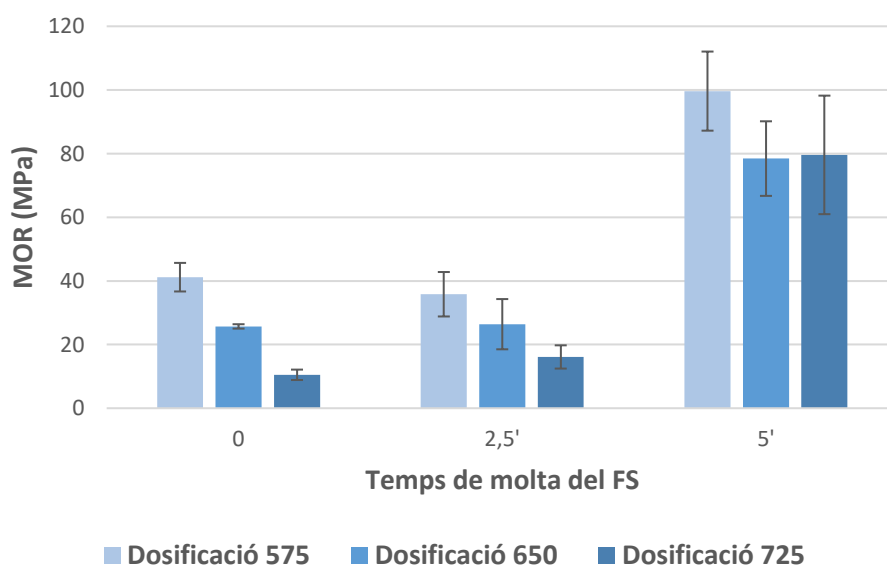
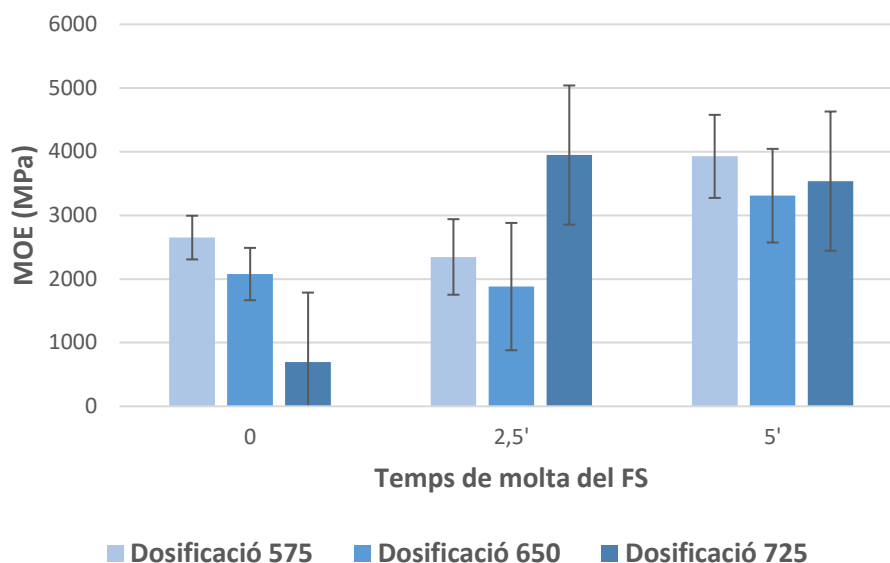


Figura 18 Resultat del càlcul del Punt de ruptura (MOR) de cada una de les dosificacions i cada temps de molturat del FS, de la millora de la matriu, calculat a partir de 3 mostres assajades a compressió en les mateixes condicions. La barra d'error correspon a la desviació estàndard.



*Figura 19 Resultat del càlcul del Mòdul d'elasticitat (MOE) de cada una de les dosificacions i cada temps de molturat del FS, de la millora de la matriu, calculat a partir de 3 mostres assajades a compressió en les mateixes condicions. La barra d'error correspon a la desviació estàndard.*

En l'assaig a compressió veiem clarament en la Figura 18 i la Figura 19 que el fet d'augmentar el temps de molturat del FS provoca un augment de la resistència i la rigidesa de la matriu a compressió. També s'observa reiteradament que la matriu amb la dosificació que conté menys aigua és la que demostra més bons resultats en aquest assaig.

#### **4.1.3. Resultats de la matriu definitiva**

En aquest apartat s'analitzaran els resultats de les provetes descrites en el punt 3.2.3. Pel que fa a les provetes curades a 60 °C a l'estufa durant 7 dies i sotmeses a 25 cicles d'assecat-humitejat, no s'han pogut obtenir resultats ja que es van trencar per causes desconegudes abans de poder ser assajades.

## 4.1.3.1. Resultats de l'assaig a flexió

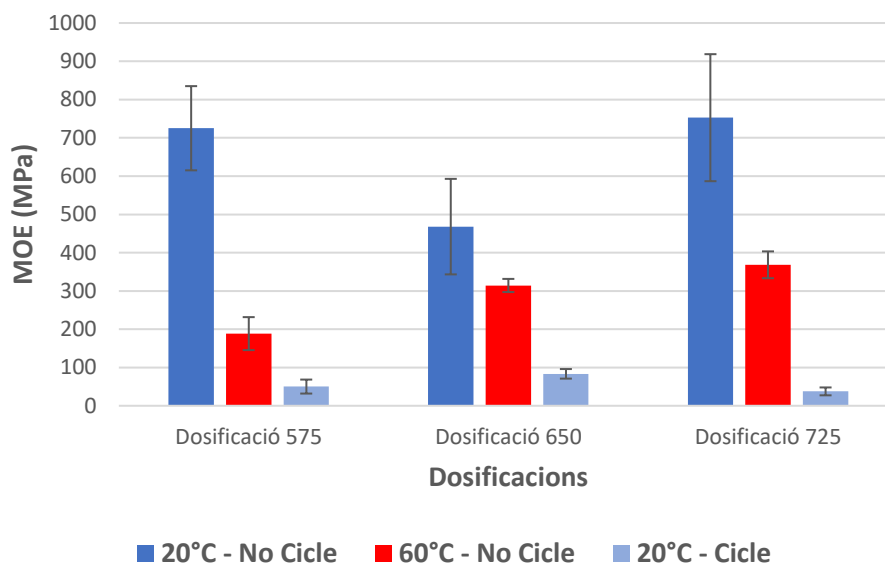


Figura 20 Resultat del càlcul del Mòdul d'elasticitat (MOE) de cada una de les dosificacions i cada tipus de curat, de la matriu definitiva, calculat a partir de 3 mostres assajades a flexió en les mateixes condicions. La barra d'error correspon a la desviació estàndard.

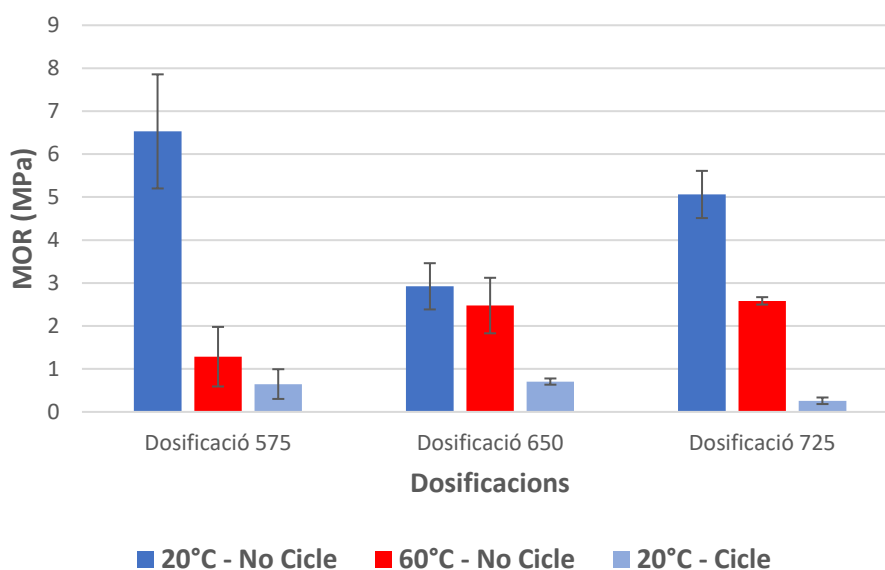


Figura 21 Resultat del càlcul del Punt de ruptura (MOR) de cada una de les dosificacions i cada tipus de curat, de la matriu definitiva, calculat a partir de 3 mostres assajades a flexió en les mateixes condicions. La barra d'error correspon a la desviació estàndard.

En els valors de l'assaig a flexió de les provetes definitives de matriu sola que podem veure en la Figura 20 i en la Figura 21, clarament s'observa com les que han estat curades a temperatura ambient (20 °C) i no han estat sotmeses a cicles d'assecat-humitejat mostren una rigidesa i resistència superiors a aquelles que s'han curat a 60 °C i tampoc s'han sotmès a cicles. El fet que les provetes curades a temperatura ambient mostrin

una flexibilitat superior, ens podria estar indicant que la realització de la polimerització en estufa és desfavorable. Finalment, també es pot veure com un cop més la primera dosificació mostra, en línies generals, més bons resultats tant pel que fa a la rigidesa com a la resistència.

#### 4.1.3.2. Resultats de l'assaig a compressió

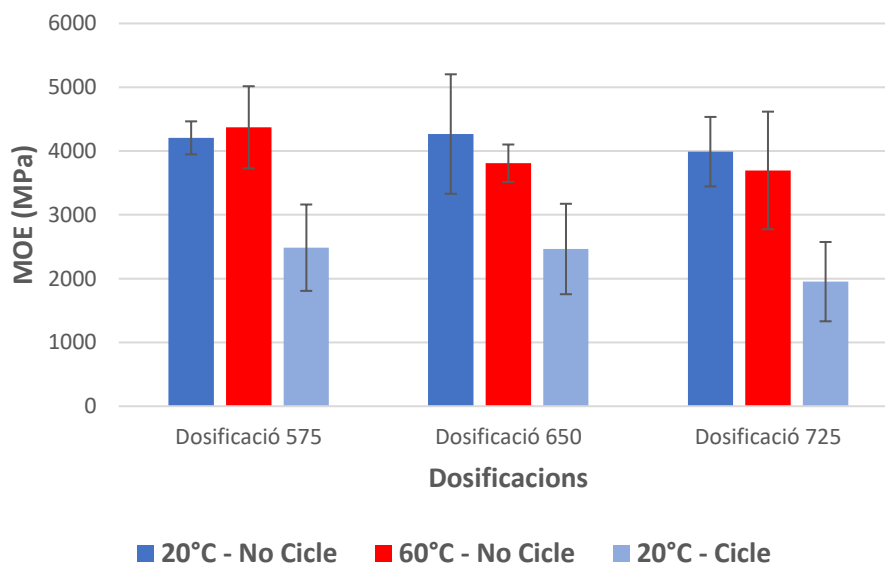


Figura 22 Resultat del càlcul del Mòdul d'elasticitat (MOE) de cada una de les dosificacions i cada tipus de curat, de la matriu definitiva, calculat a partir de 3 mostres assajades a compressió en les mateixes condicions. La barra d'error correspon a la desviació estàndard.

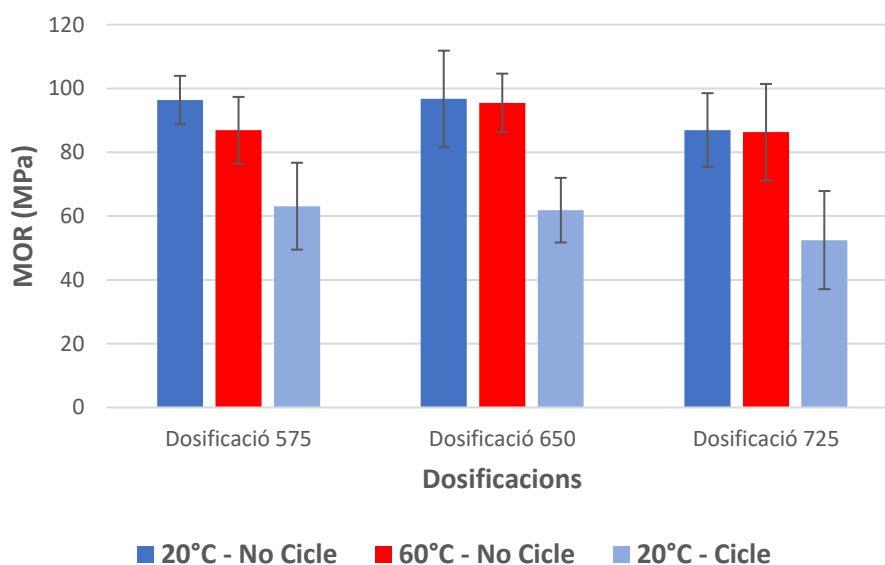


Figura 23 Resultat del càlcul del Punt de ruptura (MOR) de cada una de les dosificacions i cada tipus de curat, de la matriu definitiva, calculat a partir de 3 mostres assajades a compressió en les mateixes condicions. La barra d'error correspon a la desviació estàndard.

Pel que fa als resultats en l'assaig a compressió que trobem en la Figura 22 i Figura 23 es torna a reiterar la tendència descrita en els resultats de l'assaig a flexió.

#### 4.1.4. Resultats del material compost

En aquest apartat s'analitzaran els resultats de les provetes que incorporen fibra vegetal en la matriu de geopolímer.

##### 4.1.4.1. Resultats de l'assaig a flexió

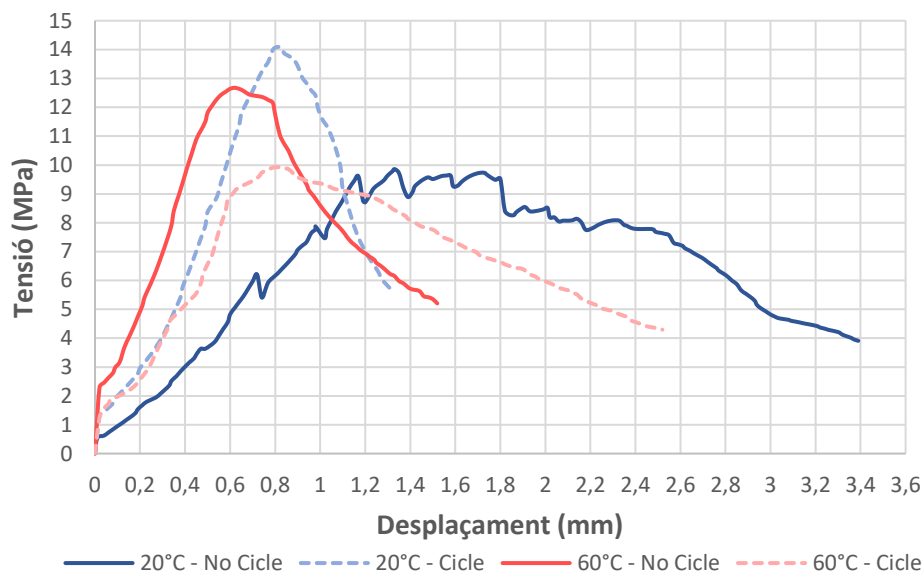


Figura 24 Valors de tensió a flexió per a la dosificació amb un contingut d'aigua de 575 ml i segons el tipus de curat.

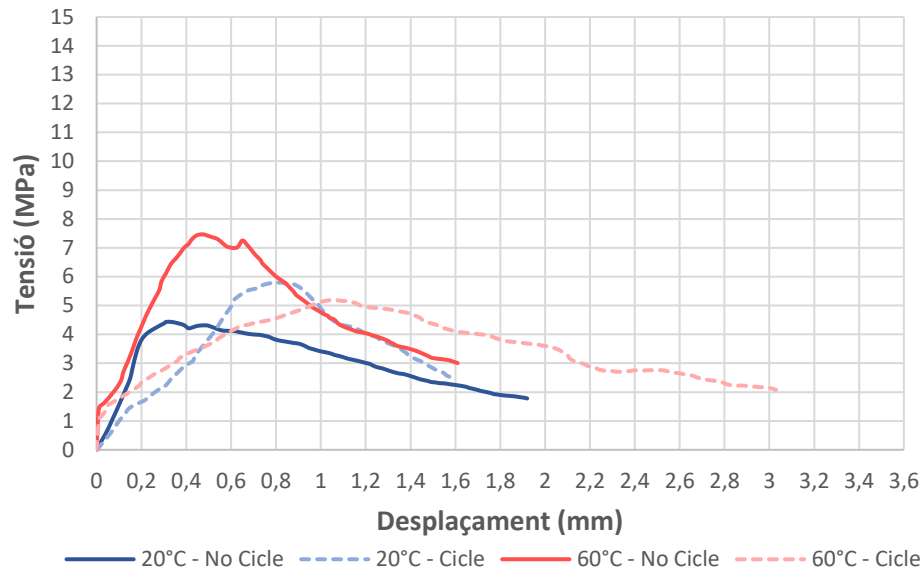


Figura 25 Valors de tensió a flexió per a la dosificació amb un contingut d'aigua de 650 ml i segons el tipus de curat.

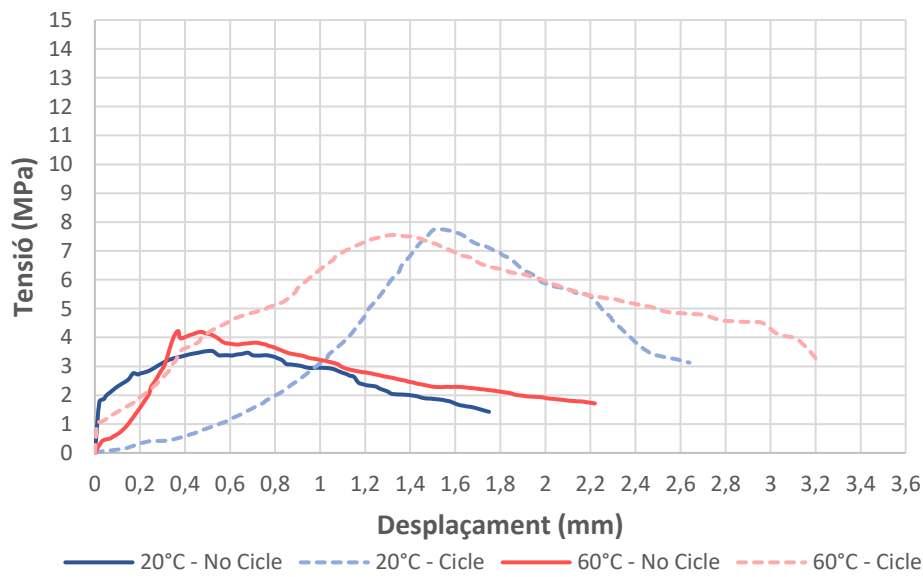


Figura 26 Valors de tensió a flexió per a la dosificació amb un contingut d'aigua de 725 ml i segons el tipus de curat.

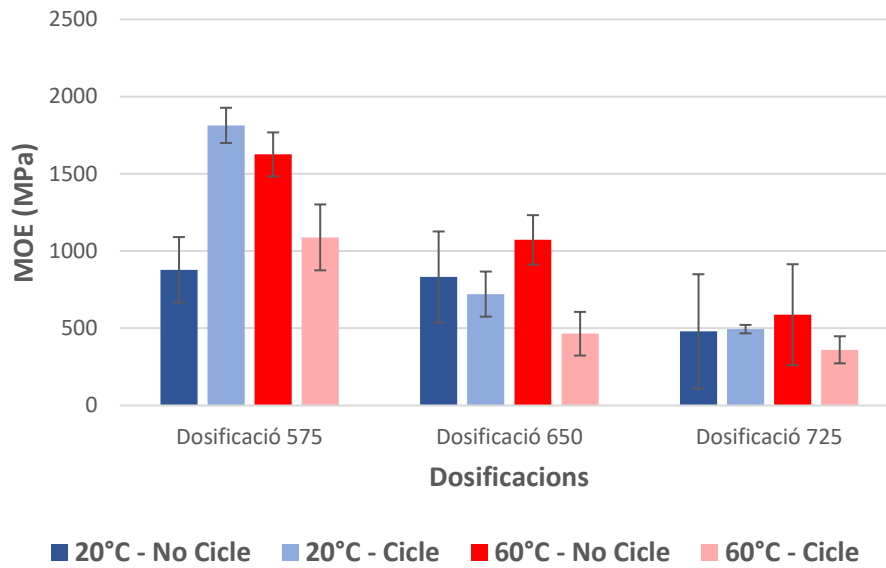


Figura 27 Resultat del càlcul del Mòdul d'elasticitat (MOE) de cada una de les dosificacions i cada tipus de curat, del material compost, calculat a partir de 3 mostres assajades a flexió en les mateixes condicions. La barra d'error correspon a la desviació estàndard.

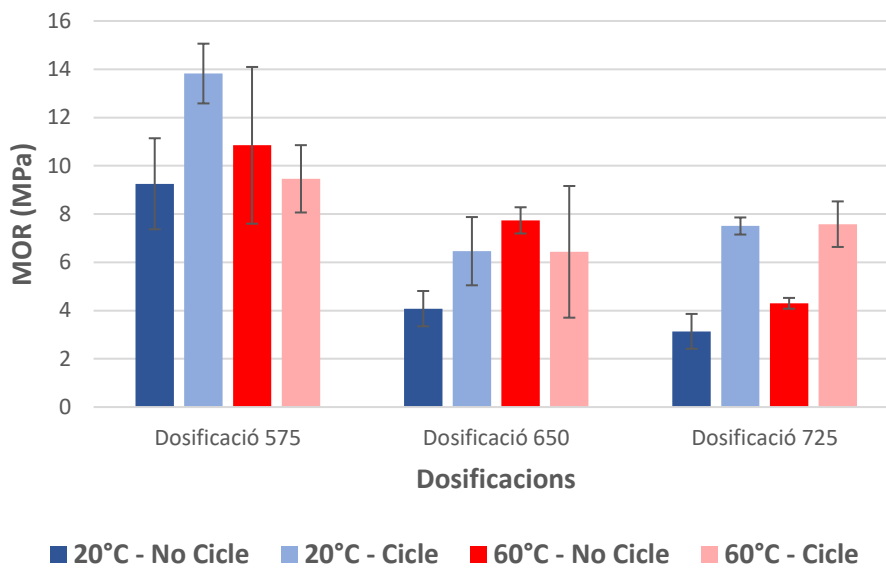


Figura 28 Resultat del càlcul del Punt de ruptura (MOR) de cada una de les dosificacions i cada tipus de curat, del material compost, calculat a partir de 3 mostres assajades a flexió en les mateixes condicions. La barra d'error correspon a la desviació estàndard.

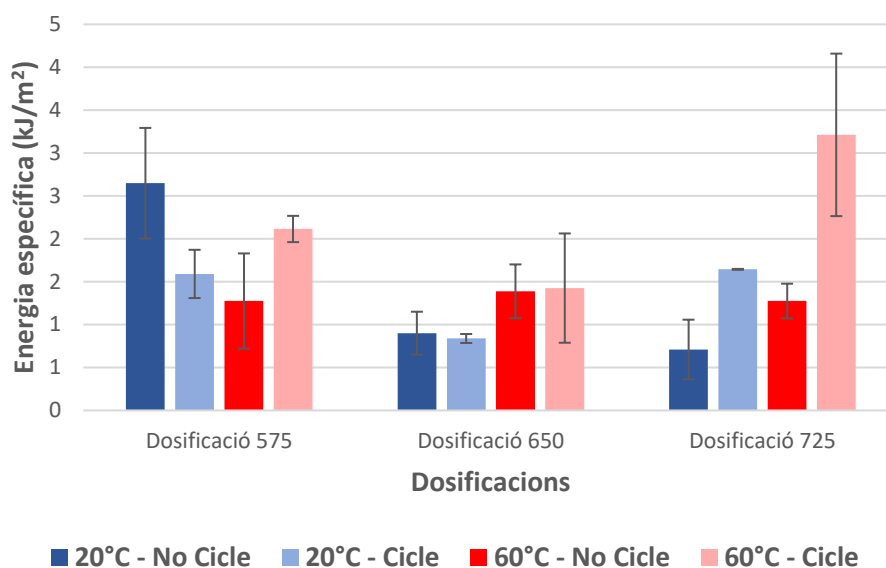


Figura 29 Resultat del càlcul de l'Energia específica de cada una de les dosificacions i cada tipus de curat, del material compost, calculada a partir de 3 mostres assajades a flexió en les mateixes condicions. La barra d'error correspon a la desviació estàndard.

En els resultats de l'assaig a flexió per a les provetes de material compost observem que en aquelles curades a 20 °C les que han estat sotmeses a cicles donen resultats de resistència i rigidesa superiors (Figura 27, Figura 28 i Figura 29) tot i que en arribar al punt de ruptura de la proveta la tensió cau, al contrari que passa en aquelles que no han estat sotmeses a cicles, que un cop han passat el MOR encara tarden més temps en trencar-se definitivament (Figura 24, Figura 25 i Figura 26). Això pot estar relacionat amb el fet que haver passat per cicles ha degradat les fibres que són les que aporten resistència al trencament superior.

Pel que fa a les provetes curades a 60 °C els resultats de resistència i rigidesa de les provetes que no han estat sotmeses a cicles és superior a les que si que han passat per cicles, tot i que no es veu una diferència clara entre les dos pel que fa a la resistència al trencament un cop passat el MOR.

Respecte les dues temperatures de curat no s'observa un patró clar de quina és la que dona millors resultats.



#### 4.1.4.2. Resultats de l'assaig a compressió

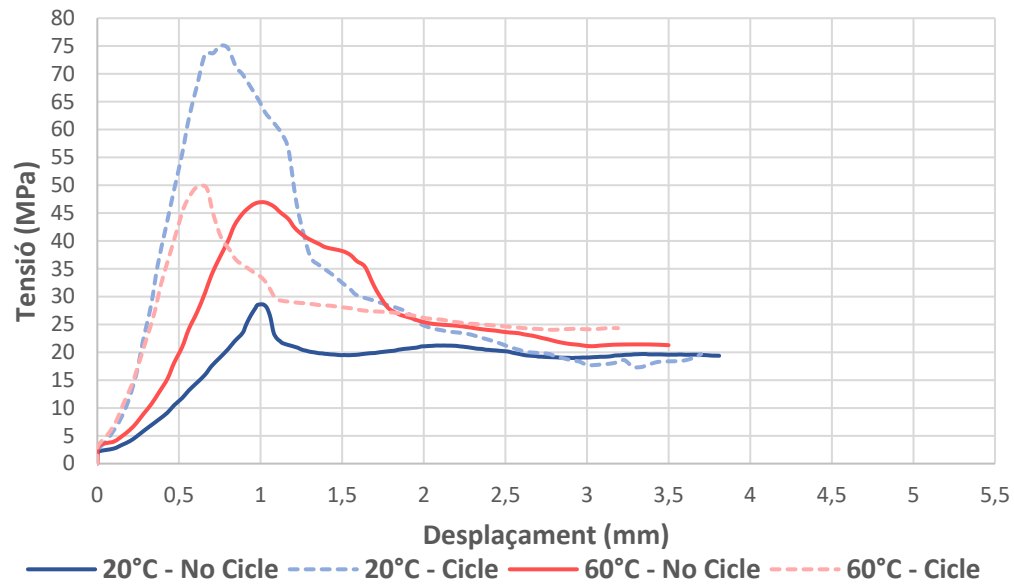


Figura 30 Valors de tensió a compressió per a la dosificació amb un contingut d'aigua de 575 ml i segons el tipus de curat.

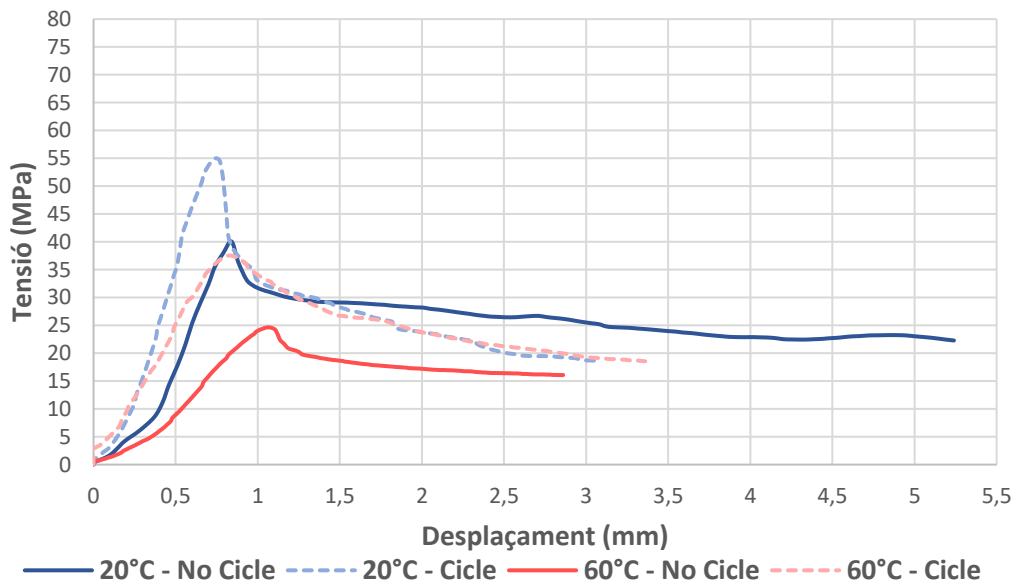


Figura 31 Valors de tensió a compressió per a la dosificació amb un contingut d'aigua de 650 ml i segons el tipus de curat.

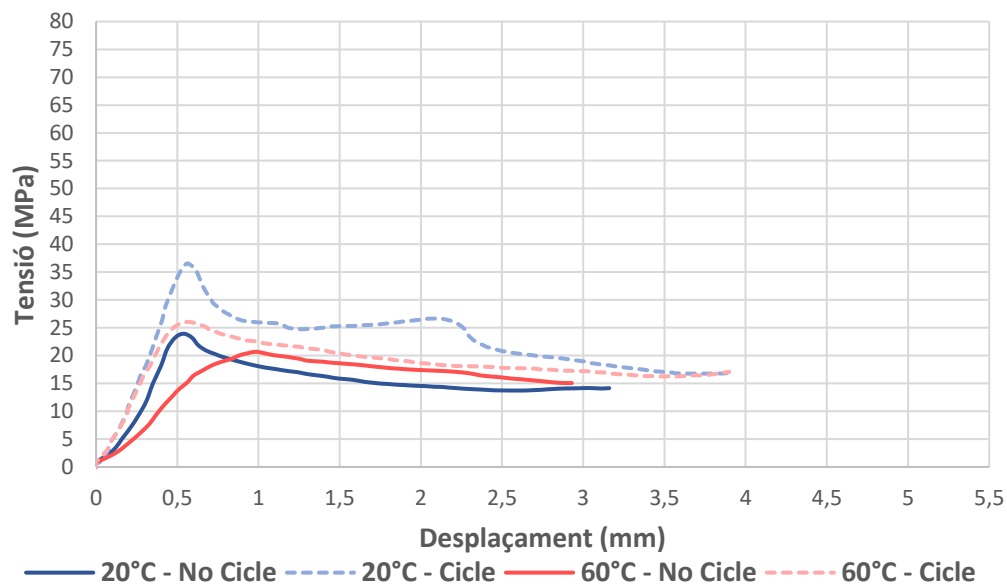


Figura 32 Valors de tensió a compressió per a la dosificació amb un contingut d'aigua de 725 ml i segons el tipus de curat.

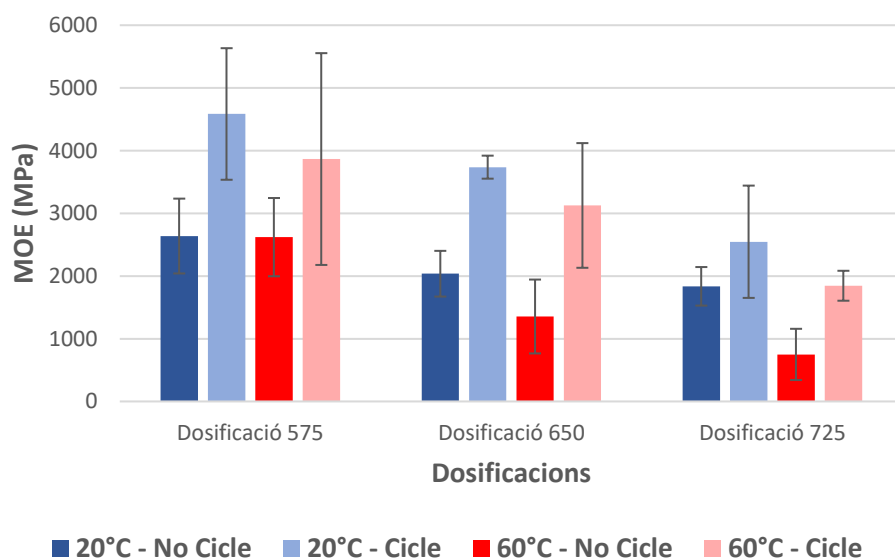


Figura 33 Resultat del càlcul del Mòdul d'elasticitat (MOE) de cada una de les dosificacions i cada tipus de curat, del material compost, calculat a partir de 3 mostres assajades a compressió en les mateixes condicions. La barra d'error correspon a la desviació estàndard.

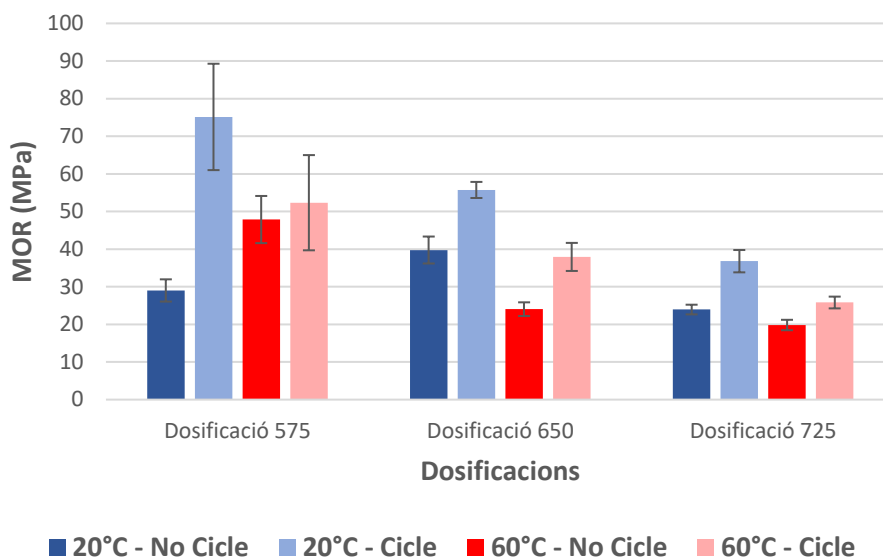


Figura 34 Resultat del càlcul del Punt de ruptura (MOR) de cada una de les dosificacions i cada tipus de curat, del material compost, calculat a partir de 3 mostres assajades a compressió en les mateixes condicions. La barra d'error correspon a la desviació estàndard.

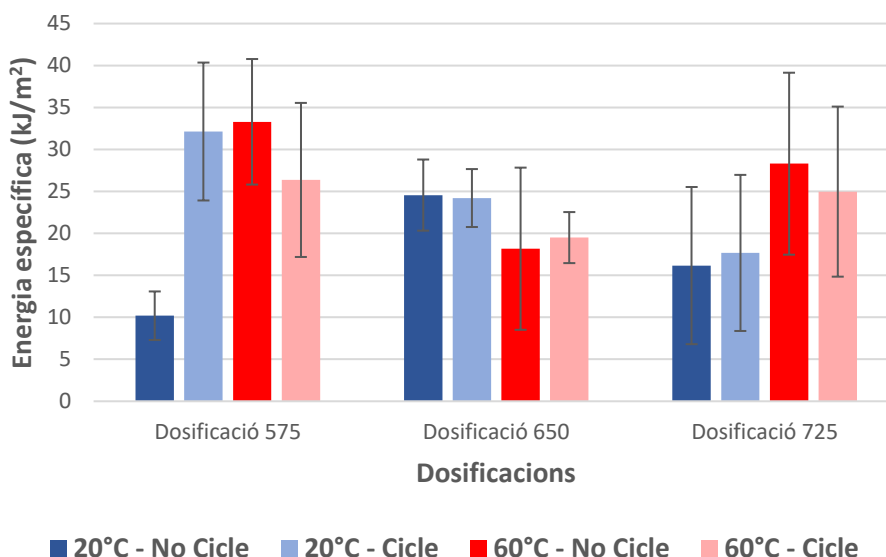


Figura 35 Resultat del càlcul de l'Energia específica de cada una de les dosificacions i cada tipus de curat, del material compost, calculat a partir de 3 mostres assajades a compressió en les mateixes condicions. La barra d'error correspon a la desviació estàndard.

En els resultats a compressió podem veure en aquest cas tant per aquelles provetes curades a 20 °C com per a les que han madurat a 60 °C que els valors de resistència i rigidesa de les que han passat el procés de cicles són superiors a les que no s'han sotmès a cicles (Figura 33, Figura 34 i Figura 35). Tot i això a diferència que a flexió no s'observa una tendència en el fet que, un cop superat el punt de ruptura, unes tardin més o menys que les altres a trencar-se completament.

## 4.2. Resultats de microestructura i anàlisi química de la matriu

En aquest apartat s'analitzaran els resultats de les diferents proves fetes per a caracteritzar la microestructura i l'anàlisi química de la matriu.

### 4.2.1. Difracció de Raig X (DRX)

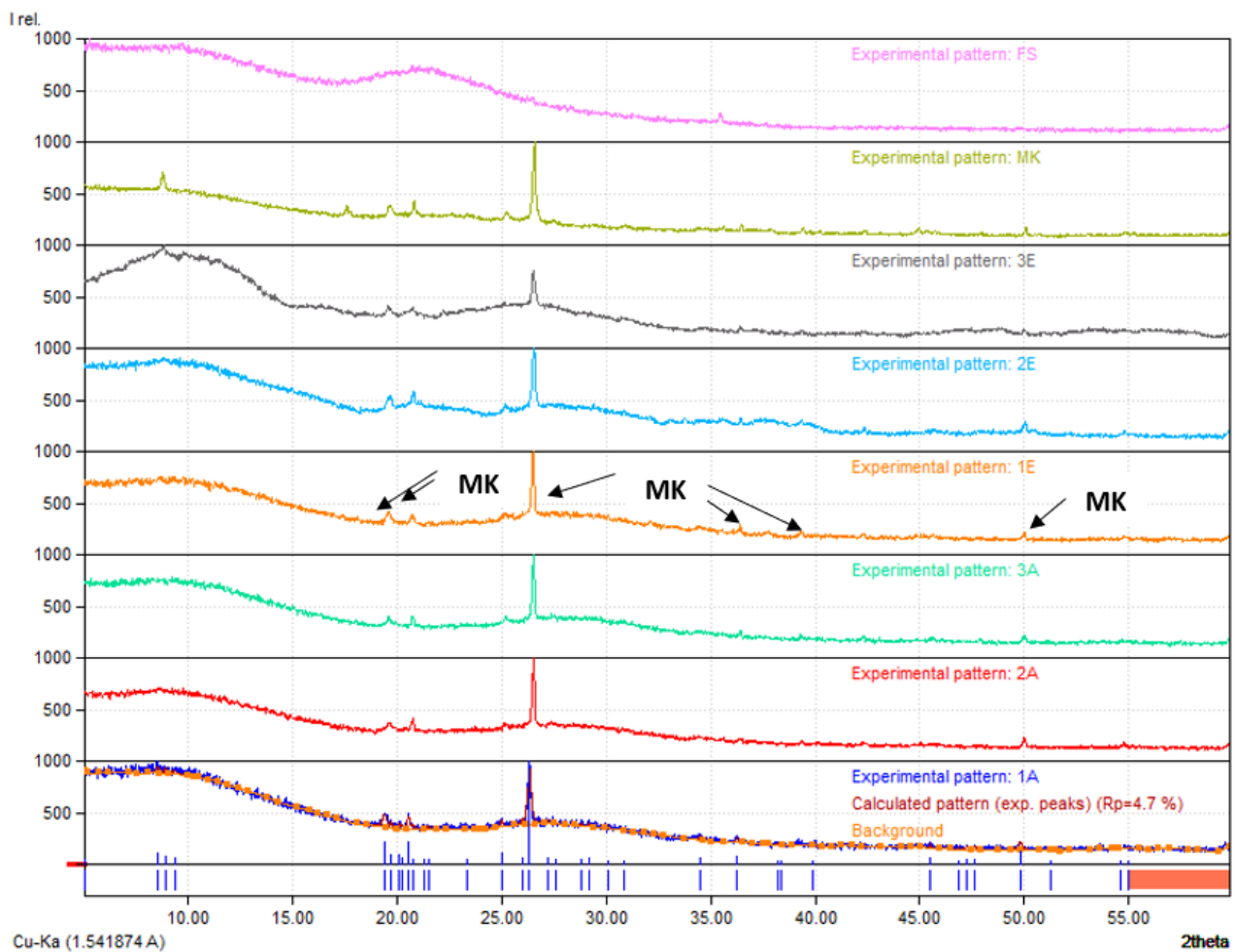
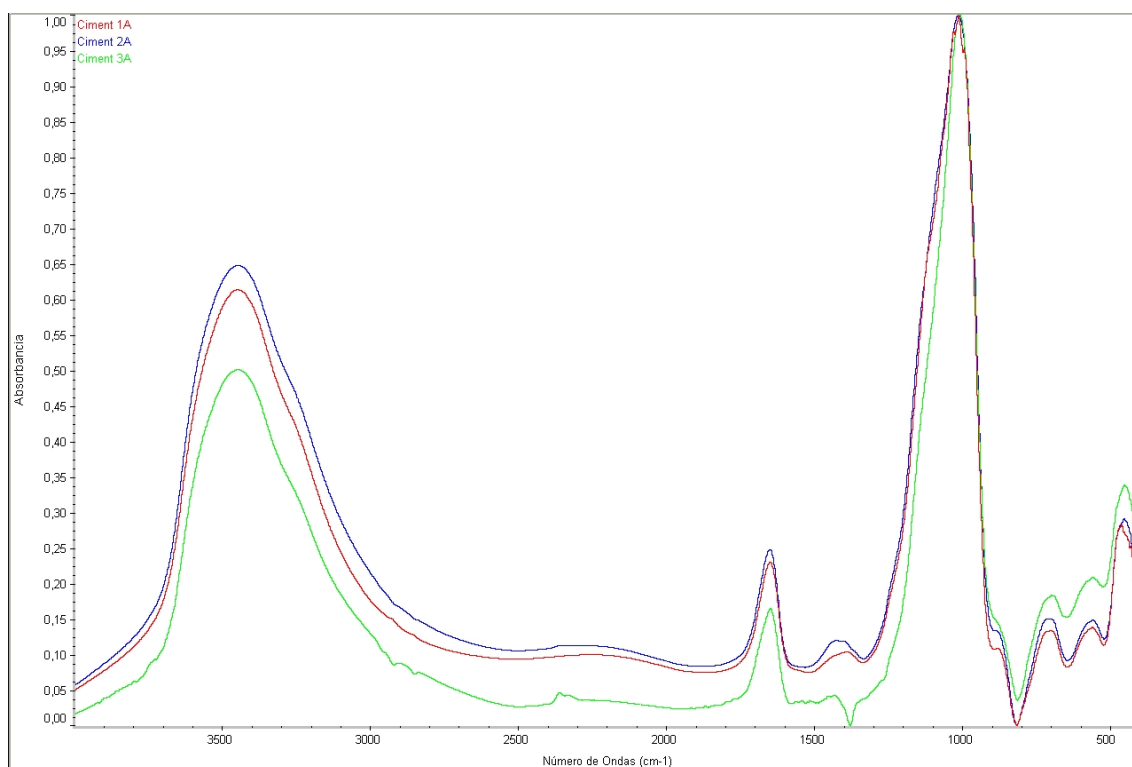


Figura 36 DRX de les matrius de geopolímer per a les diferents dosificacions i tipus de curat i per al MK i FS: (1A) Dosificació amb 575 ml d'aigua i curada a temperatura ambient (20 °C); (2A) Dosificació amb 650 ml d'aigua i curada a temperatura ambient (20 °C); (3A) Dosificació amb 725 ml d'aigua i curada a temperatura ambient (20 °C); (1E) Dosificació amb 575 ml d'aigua i curada a l'estufa (60 °C); (2E) Dosificació amb 650 ml d'aigua i curada a l'estufa (60 °C); (3E) Dosificació amb 725 ml d'aigua i curada a l'estufa (60 °C).

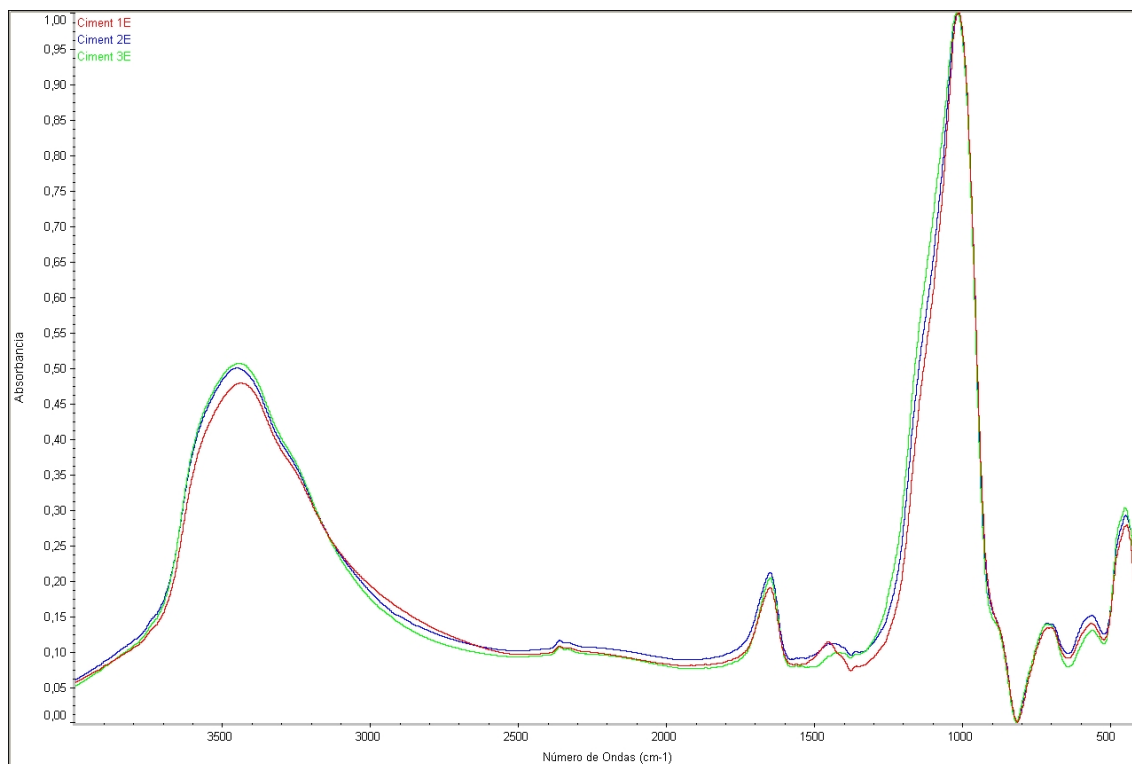
En la Figura 36 podem veure els resultats de l'anàlisi DRX de les diferents provetes de matriu de geopolímer segons dosificació i tipus de curat diferent. D'altra banda observem també els resultats que corresponen al MK i al FS tot sols per tal de poder-ho comparar amb les matrius. El que podem dir d'aquets diagrames és que en totes les provetes independentment del contingut d'aigua i el tipus de curat els pics que corresponen al MK que no ha reaccionat són molt semblants, a excepció de la proveta

corresponent a la dosificació que conté 725 ml d'aigua i que ha estat madurada a l'estufa, que mostra els pics de MK més petits i inclús alguns no són distingibles. Aquest fet podria significar que augmentar el contingut d'aigua permet que quedin menys partícules de metacaolí sense reaccionar. En el cas del FS al ser un material amorf no marca cap tipus de pic, si no que dibuixa unes corbes característiques que es veuen també dibuixades en les gràfiques de les provetes.

#### 4.2.2. Espectroscòpia d'infrarojos per transformada de Fourier (FTIR)



*Figura 37 Espectre FTIR de les matrius de geopolímer per a les diferents dosificacions i tipus de curat: (1A) Dosificació amb 575 ml d'aigua i curada a temperatura ambient (20 °C); (2A) Dosificació amb 650 ml d'aigua i curada a temperatura ambient (20 °C); (3A) Dosificació amb 725 ml d'aigua i curada a temperatura ambient (20 °C).*



*Figura 38 Espectre FTIR de les matrius de geopolímer per a les diferents dosificacions i tipus de curat: (1E) Dosificació amb 575 ml d'aigua i curada a l'estufa (60 °C); (2E) Dosificació amb 650 ml d'aigua i curada a l'estufa (60 °C); (3E) Dosificació amb 725 ml d'aigua i curada a l'estufa (60 °C).*

En la Figura 37 i la Figura 38 observem els espectres FTIR segons les diferents dosificacions i temperatura de curat. D'aquests espectres el que cal destacar és que, a diferència que en les provetes curades a temperatura ambient (20 °C), en les curades a 60 °C observem que no hi ha variacions d'estructura química entre les diverses dosificacions. Aquest fet és important ja que mostra com la quantitat de dissolució alcalina, si els curem a l'estufa, no afecta i per tant en el cas de necessitar variar aquesta quantitat per fer-ho més o menys líquid ens permetria obtenir la mateixa estructura molecular en tots els casos.

## 4.2.2. Anàlisi termogravimètrica (TGA)

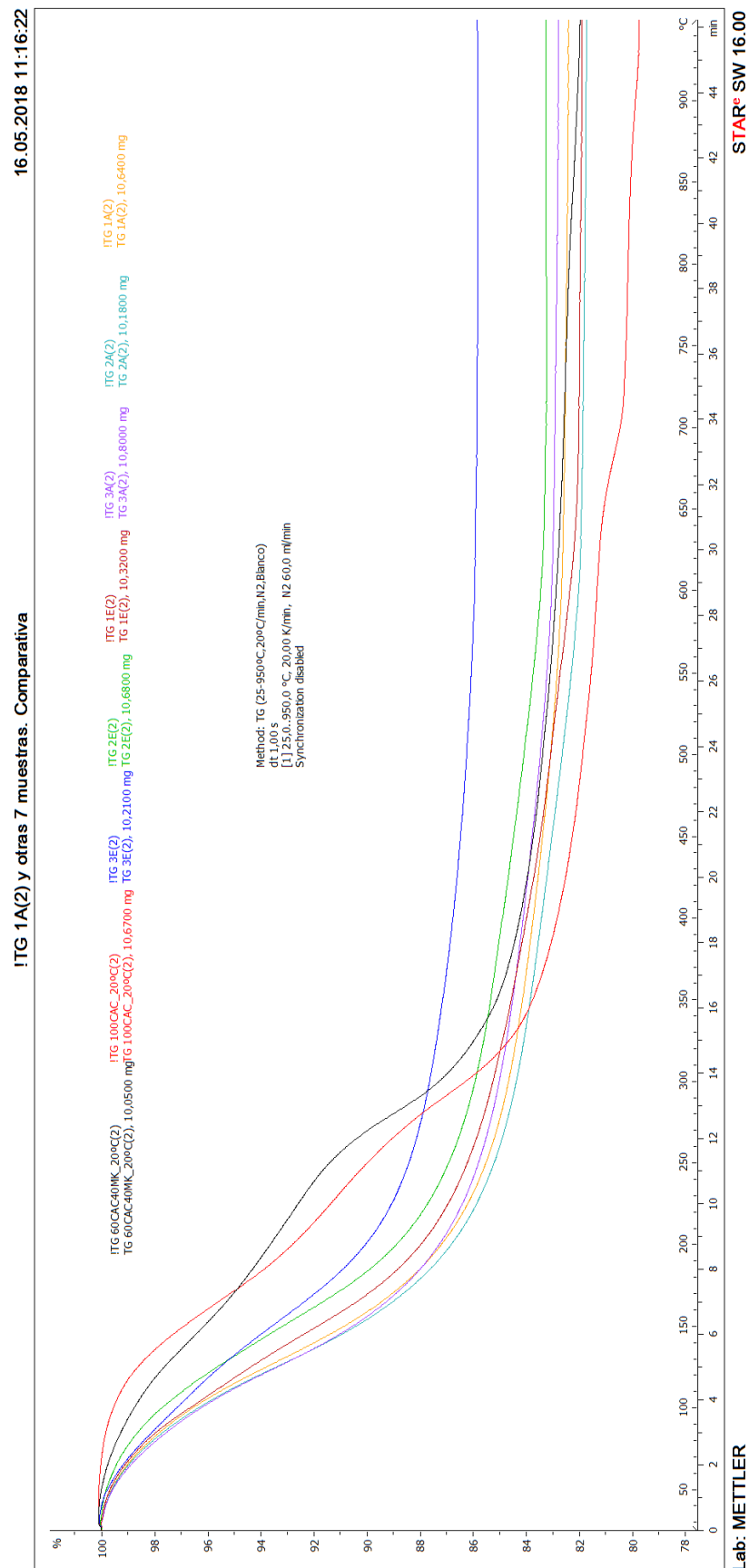


Figura 39 TGA de les matrius de geopolímer per a les diferents dosificacions i tipus de curat: (1A) Dosificació amb 575 ml d'aigua i curada a temperatura ambient (20 °C); (2A) Dosificació amb 650 ml d'aigua i curada a temperatura ambient (20 °C); (3A) Dosificació amb 725 ml d'aigua i curada a temperatura ambient (20 °C); (1E) Dosificació amb 575 ml d'aigua i curada a l'estufa (60 °C); (2E) Dosificació amb 650 ml d'aigua i curada a l'estufa (60 °C); (3E) Dosificació amb 725 ml d'aigua i curada a l'estufa (60 °C).

En la Figura 39 es pot observar l'anàlisi termogravimètrica de les diferents provetes de matriu de geopolímer segons dosificació i tipus de curat diferent. Al laboratori que ha realitzat aquesta prova se li van enviar també dues mostres fetes amb matrius d'aluminat de calç i material putzolànic, i per això figuren en la gràfica. Com podem veure, la pèrdua de massa en augmentar la temperatura és acusada al començament fins arribar als volts dels 150 °C, moment a partir del qual s'estabilitza i no s'observa disminució de la massa. En totes les provetes independentment de la dosificació i del tipus de curat es mostra una evolució similar, tot i això en la proveta que conte 725 ml d'aigua i ha estat madurada a l'estufa, hi ha hagut menys pèrdua de massa a la mateixa temperatura en comparació amb les altres. Finalment comparant-ho amb les provetes de matrius d'aluminat de calç i material putzolànic veiem que aquestes sofreixen una major pèrdua que les de geopolímer, fet positiu que demostra la potencialitat d'aquest nou material en front d'altres.

#### 4.2.3. Microscòpia electrònica (SEM BSE)

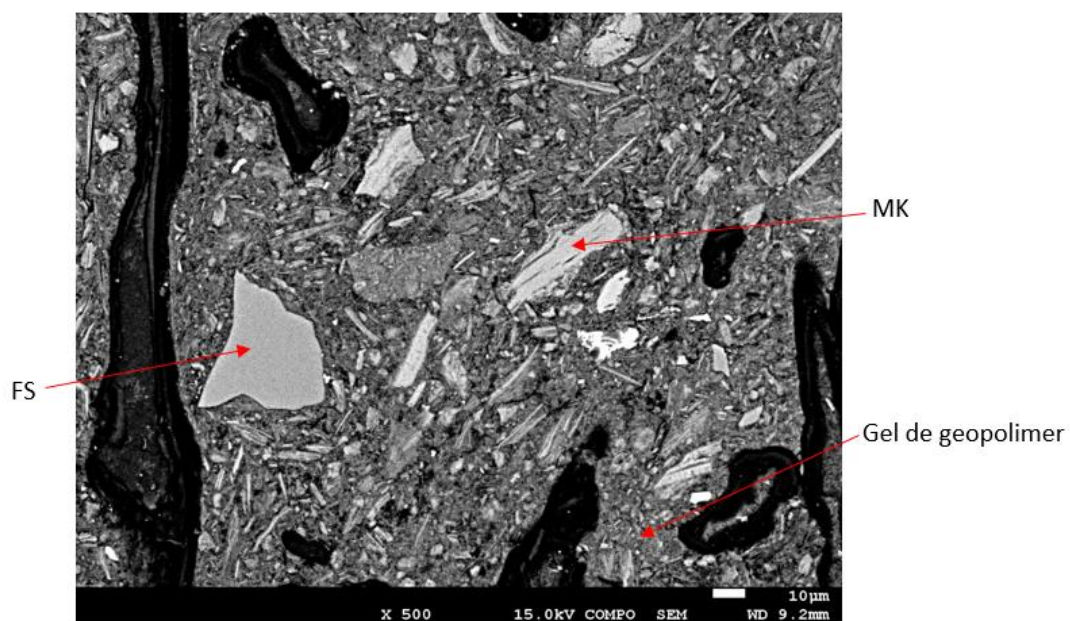


Figura 40 Microestructura i composició química del material compost (SEM BSE) corresponent a la dosificació amb 575 ml d'aigua i curada a 20 °C (Font pròpia).



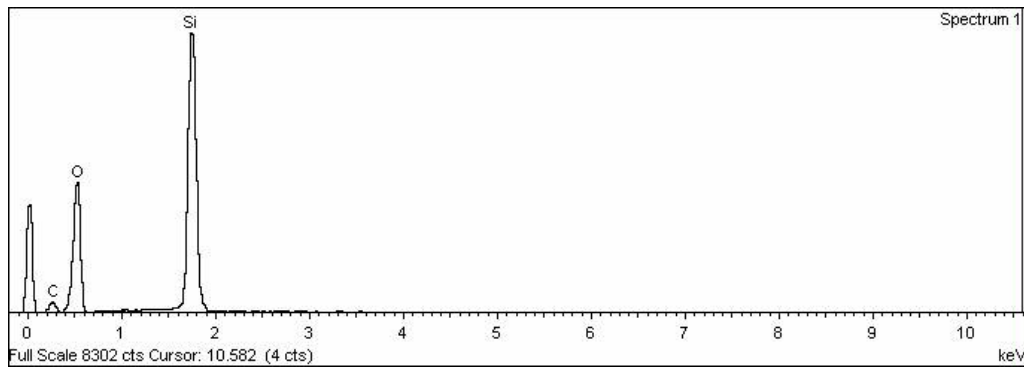


Figura 41 Composició EDS de la partícula de FS sense reaccionar (Font pròpia).

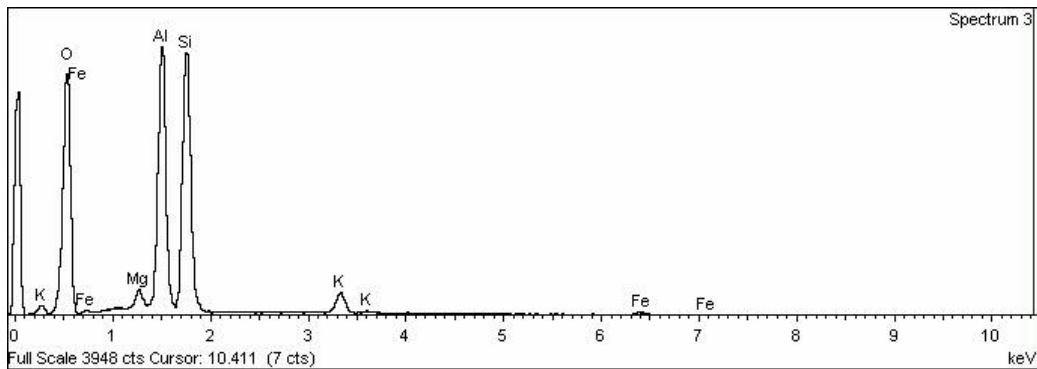


Figura 42 Composició EDS de la partícula de MK sense reaccionar (Font pròpia).

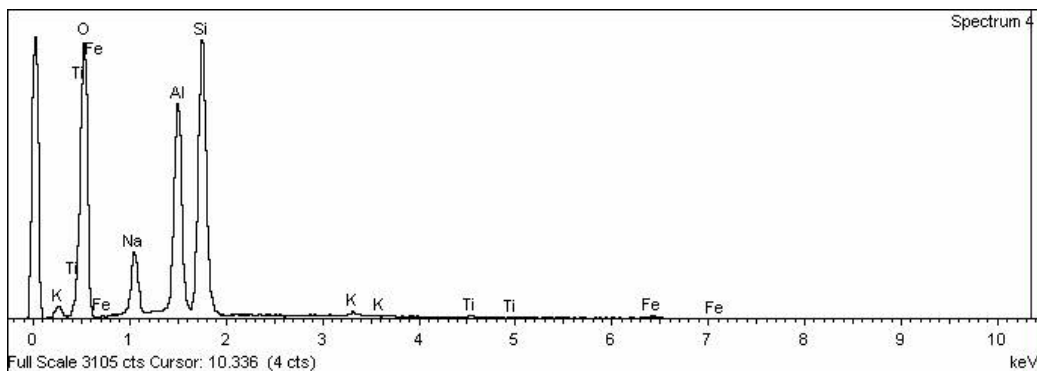


Figura 43 Composició EDS del gel de geopolímer (Font pròpia).

La microestructura i composició de la matriu de material compost s'ha pogut caracteritzar gràcies a l'anàlisi amb SEM BSE. Els diagrames EDS corresponen a les diferents parts marcades en la imatge SEM de la Figura 40. En primer lloc amb el diagrama de la Figura 41 hem pogut saber que aquestes partícules sense reacciona blanques i uniformes són FS ja que la composició d'aquest és  $\text{SiO}_2$ . A continuació, fent referència al diagrama de la Figura 42 s'ha confirmat que les partícules blanques estriades pertanyen a MK que no a reaccionat, la composició del qual és  $\text{SiO}_2$  i  $\text{Al}_2\text{O}_3$  majoritàriament. Finalment pel que fa al material que envolta aquestes partícules sense

reaccionar s'ha vist en el diagrama de la Figura 43, que corresponen al gel de geopolímer ja que trobem Si, Al, O i Na que són els elements que el componen.

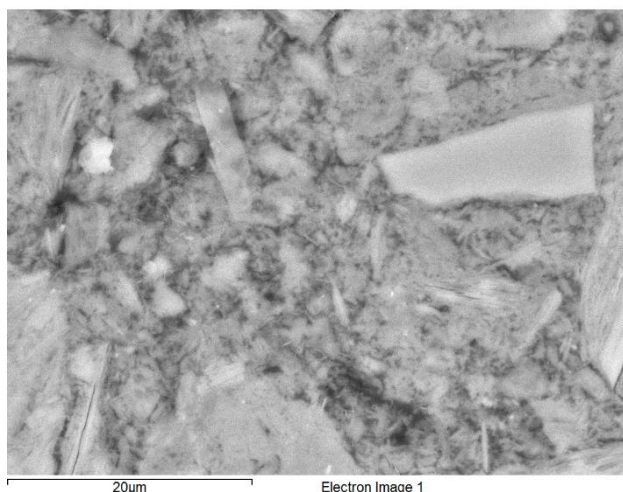


Figura 44 Microestructura i composició del material compost (SEM BSE) corresponent a la dosificació amb 650 ml d'aigua i curada a 60 °C (Font pròpia).

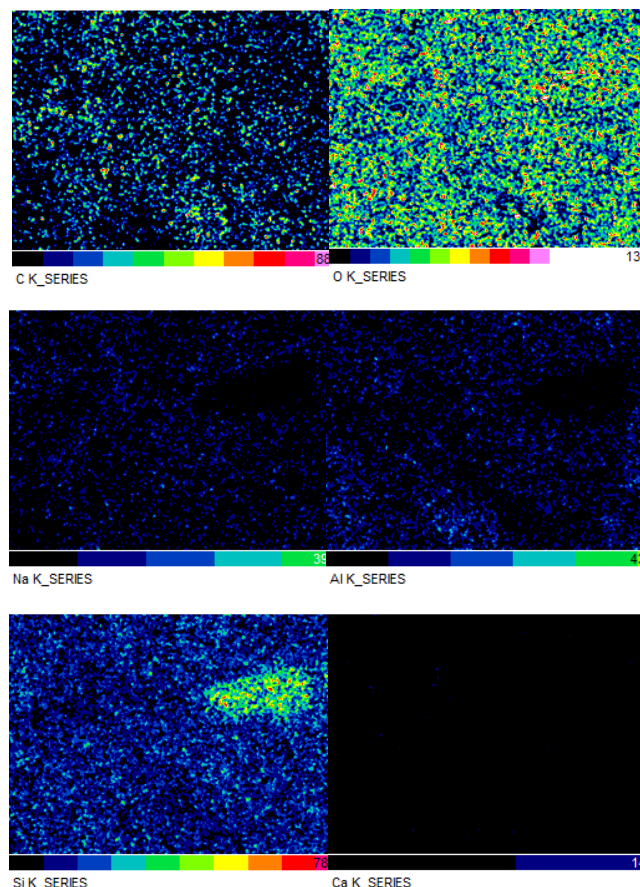


Figura 45 Mapes d'intensitat dels components de la figura 44 (Font pròpia).

Per esbrinar la composició del material compost, també l'hem caracteritzat realitzant mapes d'intensitat dels components. En la Figura 44 podem observar una superfície força uniforme a excepció d'una partícula blanca que gràcies a les imatges de la Figura 45 sabem que es tracta d'una partícula de FS ja que en la imatge del Si s'observa una elevada concentració d'aquest element en la zona en qüestió, així com també oxigen. Pel que fa a la resta de material que envolta la partícula de FS sense reaccionar podem saber que correspon a gel de geopolímer ja que en les imatges del Si, Na, Al i O mostren aquets elements repartits uniformement per la superfície.



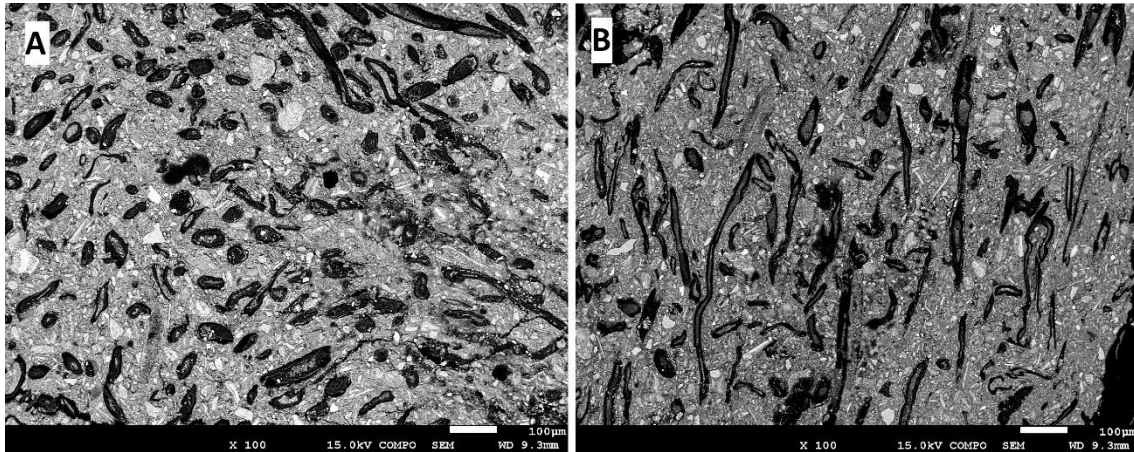


Figura 46 Microestructura de les provetes de material compost amb dosificació de 575 ml d'aigua curat a 20 °C (A) i a 60 °C (B) (Font pròpia).

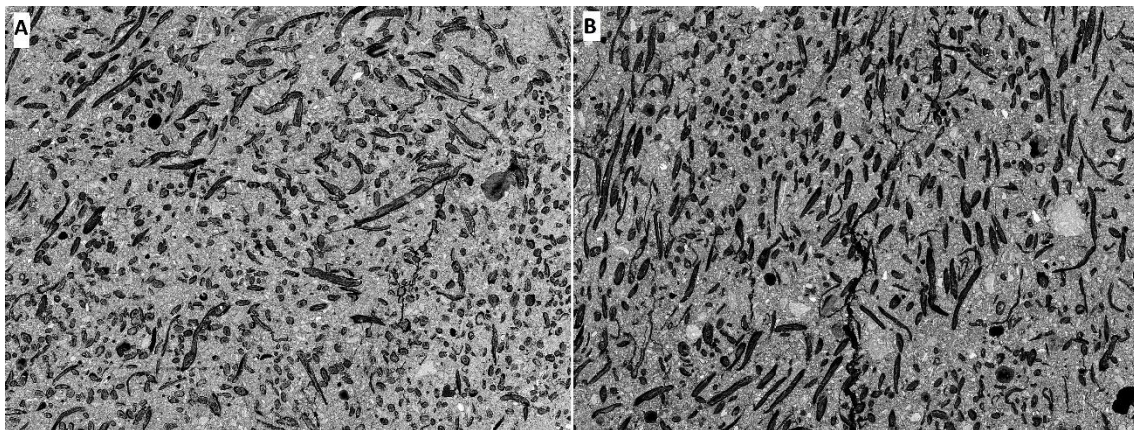


Figura 47 Microestructura de les provetes de material compost amb dosificació de 650 ml d'aigua curat a 20 °C (A) i a 60 °C (B) (Font pròpia).

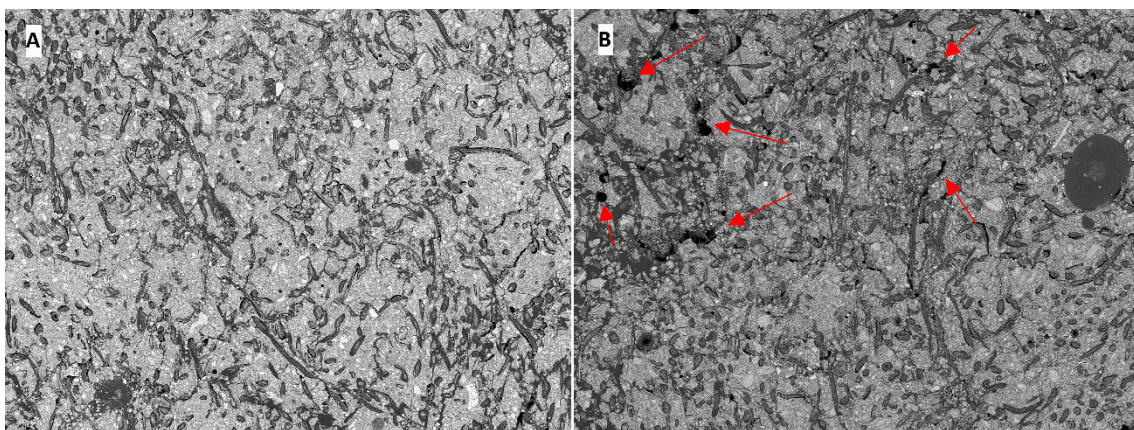


Figura 48 Microestructura de les provetes de material compost amb dosificació de 725 ml d'aigua curat a 20 °C (A) i a 60 °C (B) (Font pròpia).



En les comparacions de les imatges SEM que trobem en la Figura 46, la Figura 47 i la Figura 48, podem veure com a mateixa dosificació però diferent tipus de curat no s'observen diferències pel que fa a la quantitat de material sense reaccionar ni tampoc per la quantitat d'esquerdes, porus o per la distribució de les fibres. Tot i això en la dosificació que correspon a un contingut d'aigua de 725 ml podem veure que en la proveta curada a 60 °C la quantitat de porus, que els trobem marcats amb fletxes vermelles, és molt més alta que en el cas de les curades a 20 °C.

### 4.3. Resultats de durabilitat de les fibres

#### 4.3.1. Microscòpia electrònica (SEM)

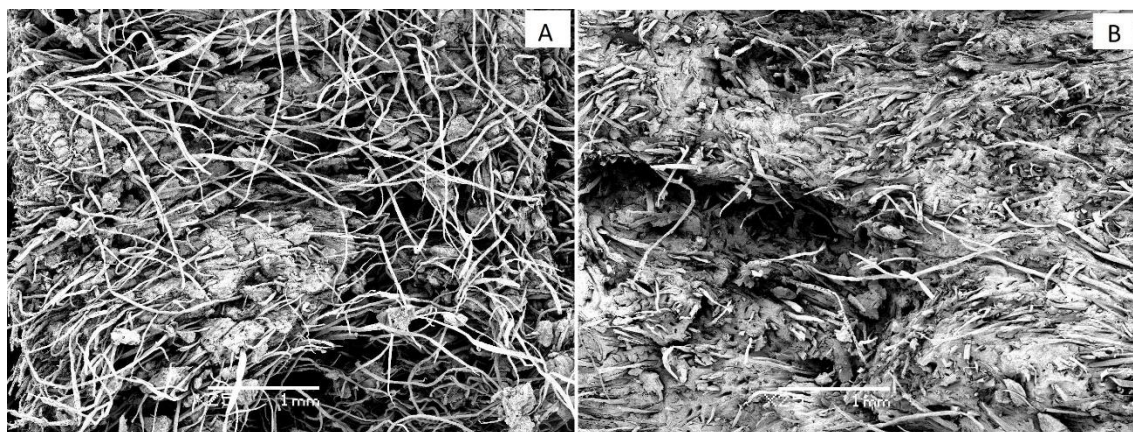
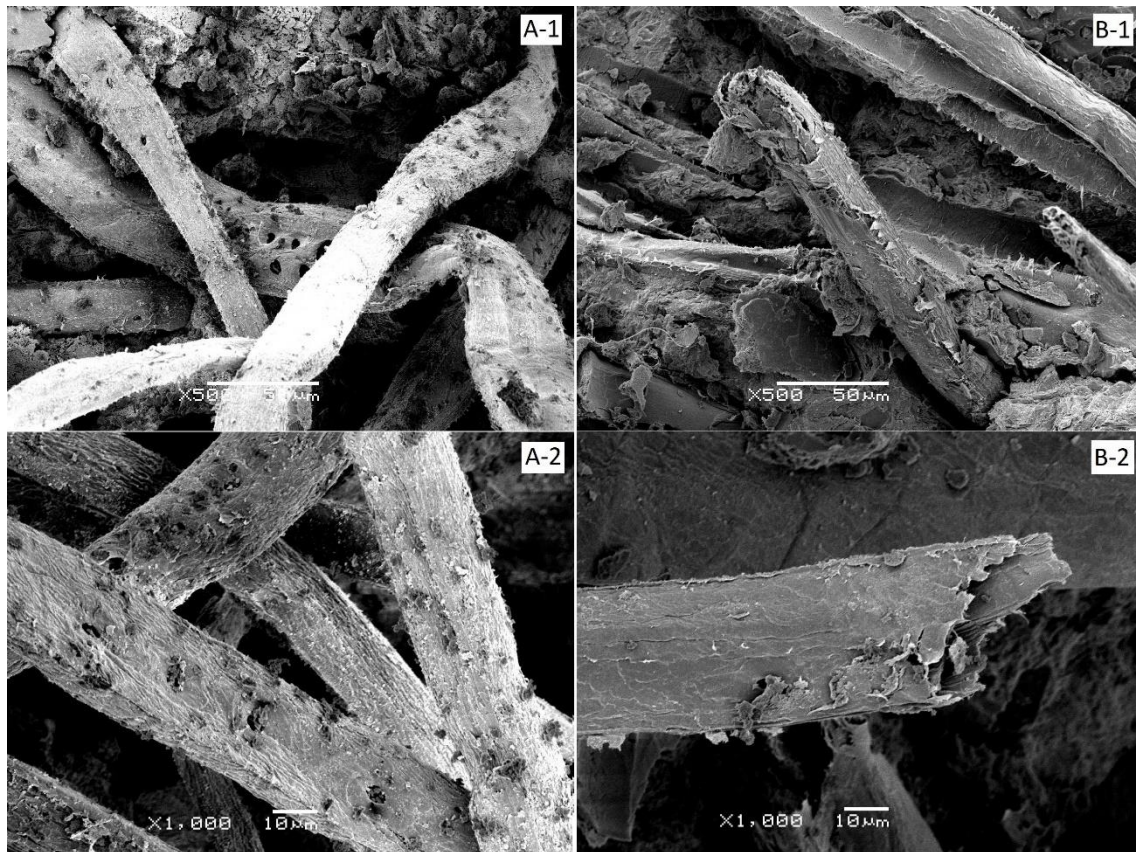


Figura 49 Imatges SEM del material compost: (A) Proveta curada a ambient (20 °C) durant 7 dies; (B) Proveta curada a ambient (20 °C) durant 7 dies i sotmesa a 25 cicles d'assecat-humitejat, ambdós corresponen a la dosificació de 575 ml d'aigua.



*Figura 50 Imatges SEM del material compost: (A-1 i A-2) Proveta curada a ambient (20 °C) durant 7 dies; (B-1 i B-2) Proveta curada a ambient (20 °C) durant 7 dies i sotmesa a 25 cicles d'assecat-humitejat, ambdós corresponen a la dosificació de 575 ml d'aigua.*

Tant en la Figura 49 com en la Figura 50 podem observar micrografies SEM de les fibres incorporades en la matriu de geopolímer, en provetes curades a l'ambient (20 °C) no sotmeses a cicles d'assecat-humitejat i de sotmeses a 25 cicles d'assecat-humitejat. En les imatges de la Figura 49 es pot veure una vista de la matriu amb les fibres i es veu com aquella que no ha estat sotmesa a cicles ha mantingut les fibres senceres i gens danyades, en canvi en l'altre cas veiem com la major part de les fibres estan trencades i força degradades. Aquest fet es veu reiterat en la Figura 50 on es pot veure augmentada la imatge de les fibres i clarament es distingeix que les que s'han sotmès a cicles estan molt més degradades que aquelles que no han passat aquest procés. Per tant sembla que les fibres vegetals no tenen una gran durabilitat pel que fa als canvis d'humitat, tot i que no ho podem determinar del cert, caldria analitzar més mostres.

#### 4.4. Resum de discussió

En aquest apartat es discutiran les relacions que s'han obtingut en els resultats de les diferents anàlisis.

En primer lloc, comparant els resultats de les provetes de matriu sola i les de material compost, es pot veure que el material compost obté més bons resultats en l'assaig a flexió, en canvi la matriu sola presenta valors més elevats en l'assaig a compressió. Aquest atribut beneficiós es deu a que les fibres aporten a la matriu major flexibilitat. També podem veure que a diferència de la matriu sola, en el material compost no empitjoren els resultats a mesura que la forma de curat és més agressiva i això pot ser un tret positiu.

D'altra banda, en el diagrama DRX podem veure que les provetes amb un contingut d'aigua de 725 ml i curades a l'estufa (60 °C) tenen menys quantitat de MK sense reaccionar a diferència de la resta de dosificacions i tipus de curat, a l'hora que en el TGA també mostren menys pèrdua de massa en relació a la resta. Aquests dos fets poden estar relacionats de tal manera que la massa que es perd amb l'augment de temperatura és MK sense reaccionar, i com que les provetes de 725 ml a 60 °C en tenen menys contingut, es veu reflectit en la menor pèrdua de massa.

Finalment, en les matrius de material compost, en els resultats de l'assaig a flexió i a compressió s'han obtingut valors de resistència i rigidesa inferiors per a les provetes curades a 20 °C que no han estat sotmeses a cicles en contraposició a les que sí que han passat els cicles, però les que no han suportat cicles demostren una resistència més prolongada un cop passat el MOR, a diferència que les que han passat cicles que un cop superat el MOR es trenquen definitivament. Això ho podem veure reflectit en l'apartat 4.3.1. on clarament es veu en les imatges SEM que aquelles provetes que han passat els cicles tenen les fibres trencades, fet que fa que la matriu no tingui aquesta resistència al trencament posterior al MOR que aporten les fibres i per tant quan es trenca el material ho fa definitivament.

## Conclusions

### Propietats mecàniques de les matrius de geopolímer

Després d'analitzar les diferents dosificacions, veiem que els valors de la resistència i el MOE depenen de factors com la quantitat d'aigua, finor de la partícula de FS y temperatura de curat. En aquest sentit, l'augment de l'aigua i del NaOH provoquen una reducció de la resistència i de la rigidesa, tant a flexió com a compressió. El mateix s'observa quan augmentem la temperatura de curat. Pel que fa a l'augment de la quantitat d'aigua i de NaOH ha permès mantenir la relació Si/Al en el valor que la literatura el descrivia com a més òptim (1,7), en canvi les relacions Na/Al i  $H_2O/Na_2O$  han anat augmentat molt i s'han superat els valors recomanats per la literatura. En el present treball s'ha dit que tant la relació Na/Al com la  $H_2O/Na_2O$  són importants pel que fa a la quantitat de material que reacciona i per tant en la formació de la fracció del gel de geopolímer que és la que confereix la resistència del material. D'aquesta manera és possible que a l'augmentar la quantitat de solució alcalina i per tant els valors de les proporcions molars Na/Al i  $H_2O/Na_2O$  la quantitat de material que reacciona és inferior, es forma menys gel de geopolímer i per tant es produeix una reducció de la resistència.

D'altra banda observem que el molturat del FS pot haver augmentat la seva reactivitat, cosa que ha millorat la resistència. Finalment, pel que fa a la durabilitat, els cicles sec-humit afecten negativament la microestructura de la matriu i redueixen la seva resistència i MOE.

### Propietats mecàniques de les matrius compostes

En els valors obtinguts pel que fa a la resistència i rigidesa tant a flexió com a compressió no s'observa, en el material compost, que quedin afectats pel curat de les provetes a l'estufa, així com tampoc es veuen minvats pels cicles sec-humit. Aquests fets semblen deguts a la incorporació de les fibres, ja que en l'estudi de la matriu definitiva s'ha observat que tant el curat a l'estufa com els cicles sec-humit disminueixen la resistència del material.

### Durabilitat de les fibres vegetals en matrius de geopolímer

Gràcies a les imatges obtingudes amb la microscòpia SEM amb detector d'electrons secundaris s'ha pogut observar les diferències entre dues mostres de la mateixa dosificació, mateixa temperatura de curat, però diferint pel que fa a haver passat per cicles sec-humit. S'ha vist que en aquella mostra que ha passat pel procés de cicles, les fibres han quedat trencades i notablement degradades a diferència de la que no ha passat pel procés de cicles. Aquest fet ens indica que les fibres vegetals mostren baixa durabilitat en el material compost amb matriu de geopolímer.

### Conclusió final

Tot i que el material compost mostra uns bons resultats pel que fa a les propietats mecàniques que demostren que és viable, les fibres vegetals experimenten baixa durabilitat.

Caldria estudiar maneres de millorar la durabilitat de les fibres en el material compost, experimentar amb tractaments a la polpa Kraft per tal de fer-la més durable en la matriu de geopolímer. A banda també seria interessant continuar estudiant diferents paràmetres com el temps de molturat ideal, la temperatura i temps de curat més idonis i la utilització d'altres tipus fibres vegetals que poguessin mostrar més durabilitat.



## Bibliografia

### Referències bibliogràfiques

AENOR, 2005. UNE-EN 196-1.

AENOR, 2013. *UNE-EN12467\_Placas planas de cemento reforzadas con fibras.*

ALOMAYRI, T., VICKERS, L., SHAIKH, F.U.A. y LOW, I.M., 2014. Mechanical properties of cotton fabric reinforced geopolymer composites. *Journal of Advanced Ceramics*, vol. 3, no. 3, pp. 184-193.

BORGES, P.H.R., BANTHIA, N., ALCAMAND, H.A., VASCONCELOS, W.L. y NUNES, E.H.M., 2016. Performance of blended metakaolin/blastfurnace slag alkali-activated mortars. *Cement and Concrete Composites*, vol. 71, pp. 42-52.

BRUNDTLAND, G.H., 1987. Informe de la Comisión Mundial sobre Medio Ambiente y el Desarrollo: Nuestro futuro común. *Documentos de las Naciones, Recolección de un ...*, pp. 416.

COUTTS, R.S.P., 2005. A review of Australian research into natural fibre cement composites. *Cement and Concrete Composites*, vol. 27, no. 5, pp. 518-526.

DEB, P.S., SARKER, P.K. y BARBHUIYA, S., 2016. Sorptivity and acid resistance of ambient-cured geopolymer mortars containing nano-silica. *Cement and Concrete Composites* [en línea], vol. 72, pp. 235-245.

DUXSON, P., FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A., PROVIS, J.L., LUKEY, G.C., PALOMO, A. y VAN DEVENTER, J.S.J., 2007. Geopolymer technology: The current state of the art. *Journal of Materials Science*, vol. 42, no. 9, pp. 2917-2933.

DUXSON, P., MALLICOAT, S.W., LUKEY, G.C., KRIVEN, W.M. y VAN DEVENTER, J.S.J., 2007.

The effect of alkali and Si/Al ratio on the development of mechanical properties of metakaolin-based geopolymers. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, vol. 292, no. 1, pp. 8-20.

DUXSON, P., PROVIS, J.L., LUKEY, G.C., MALLICOAT, S.W., KRIVEN, W.M. y VAN

DEVENTER, J.S.J., 2005. Understanding the relationship between geopolymer composition, microstructure and mechanical properties. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, vol. 269, no. 1-3, pp. 47-58.

FILHO, J.D.A.M., SILVA, F.D.A. y TOLEDO FILHO, R.D., 2013. Degradation kinetics and

aging mechanisms on sisal fiber cement composite systems. *Cement and Concrete Composites*, vol. 40, pp. 30-39.

FRAZÃO, C., BARROS, J., TOLEDO FILHO, R., FERREIRA, S. y GONÇALVES, D., 2018.

Development of sandwich panels combining Sisal Fiber-Cement Composites and Fiber-Reinforced Lightweight Concrete. *Cement and Concrete Composites*, vol. 86, pp. 206-223.

PALOMO. A., FERNANDEZ-JIMENEZ. A., CRIADO. M., «GEOPOLÍMEROS»: una única base

química y diferentes microestructuras. , 2004.

INSTITUT D'ESTUDIS CATALANS, 2016. *Tercer Informe Sobre el Canvi Climàtic a*

*Catalunya* [en línea].

INTERNATIONAL UNION OF LABORATORIES AND EXPERTS IN CONSTRUCTION

MATERIALS, S. and S. (RILEM), 1984. Test for the determination of modulus of rupture and limit of proportionality of thin fibre reinforced cement section. , vol.

17, no. No. 102, pp. 161-163.

ISMAIL, I., BERNAL, S.A., PROVIS, J.L., SAN NICOLAS, R., HAMDAN, S. y VAN DEVENTER, J.S.J., 2014. Modification of phase evolution in alkali-activated blast furnace slag by the incorporation of fly ash. *Cement and Concrete Composites*, vol. 45, pp. 125-135.

JAMES HARDIE INTERNATIONAL GROUP LIMITED, 2007. Geopolymeric Particles, Fibers, Shaped Articles and Methods of Manufacture.

KAMSEU, E., BIGNOZZI, M.C., MELO, U.C., LEONELLI, C. y SGLAVO, V.M., 2013. Design of inorganic polymer cements: Effects of matrix strengthening on microstructure. *Construction and Building Materials*, vol. 38, pp. 1135-1145.

KONG, D.L.Y. y SANJAYAN, J.G., 2008. Damage behavior of geopolymer composites exposed to elevated temperatures. *Cement and Concrete Composites* [en línea], vol. 30, no. 10, pp. 986-991.

LAHOTI, M., NARANG, P., TAN, K.H. y YANG, E.H., 2017. Mix design factors and strength prediction of metakaolin-based geopolymer. *Ceramics International*, vol. 43, no. 14, pp. 11433-11441.

LEE, N.K. y LEE, H.K., 2016. Influence of the slag content on the chloride and sulfuric acid resistances of alkali-activated fly ash/slag paste. *Cement and Concrete Composites* [en línea], vol. 72, pp. 168-179.

MOHR, B.J., NANKO, H. y KURTIS, K.E., 2005. Durability of thermomechanical pulp fiber-cement composites to wet/dry cycling. *Cement and Concrete Research*, vol. 35, no. 8, pp. 1646-1649.

- ONUAGULUCHI, O. y BANTHIA, N., 2016. Plant-based natural fibre reinforced cement composites: A review. *Cement and Concrete Composites*, vol. 68, pp. 96-108.
- PACHECO-TORGAL, F., MOURA, D., DING, Y. y JALALI, S., 2011. Composition, strength and workability of alkali-activated metakaolin based mortars. *Construction and Building Materials* [en línea], vol. 25, no. 9, pp. 3732-3745.
- PAN, Z. y SANJAYAN, J.G., 2010. Stress-strain behaviour and abrupt loss of stiffness of geopolymer at elevated temperatures. *Cement and Concrete Composites*, vol. 32, no. 9, pp. 657-664.
- PAN, Z. y SANJAYAN, J.G., 2012. Factors influencing softening temperature and hot-strength of geopolymers. *Cement and Concrete Composites*, vol. 34, no. 2, pp. 261-264.
- RODRÍGUEZ, E.D., BERNAL, S.A., PROVIS, J.L., PAYA, J., MONZO, J.M. y BORRACHERO, M.V., 2013. Effect of nanosilica-based activators on the performance of an alkali-activated fly ash binder. *Cement and Concrete Composites*, vol. 35, no. 1, pp. 1-11.
- ROWLES, M.R., CONNOR, B.O., ROWLES, M. y CONNOR, B.O., 2003. Chemical Optimization of the Compressive Strength of Aluminosilicate Geopolymers Synthesis by Sodium Silicate.
- SANTOS, S.F., SCHMIDT, R., ALMEIDA, A.E.F.S., TONOLI, G.H.D. y SAVASTANO, H., 2015. Supercritical carbonation treatment on extruded fibre-cement reinforced with vegetable fibres. *Cement and Concrete Composites*, vol. 56, pp. 84-94.

SHEN, B., HUBLER, M., PAULINO, G.H. y STRUBLE, L.J., 2008. Functionally-graded fiber-reinforced cement composite: Processing, microstructure, and properties. *Cement and Concrete Composites*, vol. 30, no. 8, pp. 663-673.

SILVA, F. de A., MOBASHER, B. y FILHO, R.D.T., 2009. Cracking mechanisms in durable sisal fiber reinforced cement composites. *Cement and Concrete Composites*, vol. 31, no. 10, pp. 721-730.

TEIXEIRA, R.S., TONOLI, G.H.D., SANTOS, S.F., RAYÓN, E., AMIGÓ, V., SAVASTANO, H. y ROCCO LAHR, F.A., 2018. Nanoindentation study of the interfacial zone between cellulose fiber and cement matrix in extruded composites. *Cement and Concrete Composites*, vol. 85, pp. 1-8.

TOLÊDO ROMILDO D., F.D., GHAVAMI, K., ENGLAND, G.L. y SCRIVENER, K., 2003. Development of vegetable fibre-mortar composites of improved durability. *Cement and Concrete Composites*, vol. 25, no. 2, pp. 185-196.

TONOLI, G.H.D., BELGACEM, M.N., SIQUEIRA, G., BRAS, J., SAVASTANO, H. y ROCCO LAHR, F.A., 2013. Processing and dimensional changes of cement based composites reinforced with surface-treated cellulose fibres. *Cement and Concrete Composites*, vol. 37, pp. 68-75.

TRINDADE, A.C.C., AR, I.O.M., ALMEIDA, D.C.T., ALCAMAND, H.A., BORGES, P.H.R. y SILVA, A., 2018. Strain-Hardening Cement-Based Composites, vol. 15, no. Davidovits 1999.

ZHANG, M., ZHAO, M., ZHANG, G., EL-KORCHI, T. y TAO, M., 2017. A multiscale investigation of reaction kinetics, phase formation, and mechanical properties of

metakaolin geopolymers, *Cement and Concrete Composites*, vol. 78, pp. 21-32.

ZHANG, Z.H., ZHU, H.J., ZHOU, C.H. y WANG, H., 2016. Geopolymer from kaolin in China:

An overview. *Applied Clay Science* [en línea], vol. 119, pp. 31-41.

ZUDA, L., DRCHALOV??, J., ROVNAN??K, P., BAYER, P., KERNER, Z., 2010. Alkali-activated

aluminosilicate composite with heat-resistant lightweight aggregates exposed to

high temperatures: Mechanical and water transport properties. *Cement and*

*Concrete Composites*, vol. 32, no. 2, pp. 157-163.

## **Annexos**

Annex A. Fitxes tècniques dels materials usats.....	88
---	----

## Annex A. Fitxes tècniques dels materials usats

### Fum de sílice de ARCIRESA



## HUMO DE SÍLICE

Análisis Químico		
%	Típico	garantizado
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,21	—
SiO <sub>2</sub>	94,82	Min 93,5
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,10	—
MgO	0,30	—
CaO	0,40	—
K <sub>2</sub> O	0,40	—
Na <sub>2</sub> O	0,15	—
Cl <sup>-</sup>	0,02	Max 0,1
P/C	2,70	Max 4

Propiedades Físicas			
	típico	Garantizado	standard
Densidad	2,30	2,25	g/cm <sup>3</sup>

Otros datos de interés
El HUMO DE SÍLICE es un producto con características puzolánicas obtenido de los gases de emisión de los hornos que producen Silicio Metal.



## Metacaolín Peser de ARCIRESA



# METACAOLÍN PESER®



## 1. DESCRIPCIÓN DEL PRODUCTO

El **metacaolín Peser®** es un producto con elevadas propiedades puzolánicas obtenido mediante activación térmica de caolines (calcinación a temperatura controlada en horno rotativo) y posterior micronización o molienda ultrafina del producto obtenido.

El **metacaolín Peser®** es un silicato de aluminio deshidroxilado, de composición general  $2\text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ , de estructura amorfa, no cristalina, constituido por partículas laminares de elevada finura.

## 2. CAMPO DE APLICACIÓN

El **metacaolín Peser®** se utiliza principalmente como **aditivo puzolánico de morteros y hormigones basados en cementos Portland o cal**.

El **metacaolín Peser®** se combina químicamente con el hidróxido de calcio del proceso de hidratación del cemento para formar silicatos, silicoaluminatos y aluminatos de calcio hidratados adicionales, los cuales se depositan en los espacios existentes en el cemento, originando la densificación de la matriz (menor porosidad) y contribuyendo al incremento de la resistencia, la reducción de la permeabilidad y de la reactividad álcali-silice, al control de la eflorescencia, al aumento de resistencia al ataque químico y al ciclo hielo/deshielo, mejorando así la durabilidad del hormigón.

El color blanco del **metacaolín Peser®** fabricado por ARCIRESA posibilita su empleo en infraestructuras y aplicaciones arquitectónicas especiales e incluso en la producción de cemento blanco adicionado.

*Dosificación habitual:* sustitución del 5 – 15 % del peso total de cemento por metacaolín.

## 3. PROPIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS Y GRANULOMÉTRICAS

### Propiedades físicas\*

Aspecto/Color.....	Polvo blanco
Pérdida por calcinación.....	< 1,50
Puzolanicidad (Ensayo Chapelle).....	988 g Ca(OH) <sub>2</sub> /g
Superficie específica (Blaine).....	10.971 cm <sup>2</sup> /g
Demanda de agua.....	106,2 %
Índice actividad resistente 28 días	111,6 %
Densidad aparente:	
– Aireada.....	600 kg/m <sup>3</sup>
– Compactada.....	800 kg/m <sup>3</sup>
Peso específico.....	2,54 g/cm <sup>3</sup>



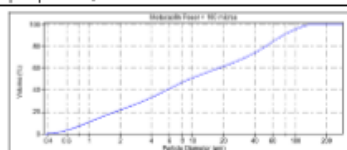
### Análisis químico

% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....	40,24
% SiO <sub>2</sub> .....	54,61
% Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....	0,25
% TiO <sub>2</sub> .....	1,08
% CaO.....	< 0,10
% MgO.....	< 0,10
% Na <sub>2</sub> O.....	0,02
% K <sub>2</sub> O.....	1,44

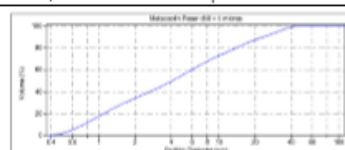
\* Valores correspondientes al material con d<sub>50</sub> = 5 micras.

### Distribuciones granulométricas

Impalpable, 100% de material < 100 micras



Ultrafino, diámetro medio partícula d<sub>50</sub> = 5 µm



## 4. PRESENTACIÓN Y SUMINISTRO

El **metacaolín Peser®** de ARCIRESA se suministra en los siguientes formatos:

- Big – bags de 500 kg y de 1.000 kg.
- Sacos de papel, de 20 kg, en pallets de 5 sacos en 10 alturas con un peso de 1.000 kg.

**Sika® ViscoCrete®-3425**

## Superplastificante de alto rendimiento

<b>Descripción del Producto</b>	Sika® ViscoCrete®-3425 es un superplastificante de altas prestaciones para hormigones.
<b>Usos</b>	<p>Sika® ViscoCrete®-3425 se utiliza para la confección de hormigones con gran necesidad de reducción de agua y de excelente fluidez</p> <p>Sika® ViscoCrete®-3425 se utiliza principalmente para las siguientes aplicaciones:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Hormigón prefabricado.</li> <li>■ Hormigón autocompactante.</li> </ul>
<b>Características/Ventajas</b>	<p>Sika® ViscoCrete®-3425 es un poderoso superplastificante que combina diferentes mecanismos de actuación.</p> <p>Debido a la adsorción superficial y al efecto estérico, que separan las partículas de cemento, se consiguen las siguientes propiedades :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Reducción muy importante de agua de amasado dando hormigones de alta densidad, altas resistencias y gran impermeabilidad.</li> <li>■ Excelente plasticidad, mejorando la fluidez, la colocación y la compactación.</li> <li>■ Bajo coste de energía en elementos prefabricados curados al vapor.</li> <li>■ Especialmente indicado para la preparación de hormigón autocompactante.</li> <li>■ Disminuye la retracción</li> </ul> <p>No contiene cloruros ni sustancias que puedan provocar o favorecer la corrosión del acero y por lo tanto pueden utilizarse sin restricciones en hormigones armados o pretensados.</p>
<b>Ensayos</b>	
<b>Certificados/Normas</b>	Cumple las especificaciones de la norma UNE-EN 934-2. Tablas 3.1 y 3.2: superplastificante / reductor de agua.
<b>Datos del Producto</b>	
<b>Forma</b>	
<b>Apariencia/Color</b>	Líquido blanco amarillento
<b>Presentación</b>	Contenedores de m <sup>3</sup> y bajo pedido puede suministrarse a granel
<b>Almacenamiento</b>	
<b>Condiciones de Almacenamiento/Conservación</b>	12 meses desde su fecha de fabricación, en sus envases de origen bien cerrados y no deteriorados entre + 5°C y +35°C. Proteger de la acción directa de la luz solar y de las heladas.
<b>Datos Técnicos</b>	
<b>Composición química</b>	Policarboxilato modificado en base acuosa
<b>Densidad</b>	1,05 kg/l ± 0,01
<b>Valor de pH</b>	4 ± 1.



# Construcción

Contenido en Cloruros	Exento de cloruros	(EN 934-2)
Efecto del fraguado	No retardante	
Efecto de sobredosificación	Puede producir exudación	
Informacion del Sistema		
Detalles de Aplicación		
Consumo/Dosificación	Dosificación recomendada: Para media trabajabilidad: 0,2-0,8% del peso del cemento Para una alta trabajabilidad, con baja relación agua/cemento y para hormigón autocompactante: 1,0-1,7 % del peso del cemento.	
Condiciones de Aplicacion/Limitaciones		
Compatibilidad	Sika® ViscoCrete®-3425 se puede combinar con otros aditivos de la gama Sika. Se recomienda hacer ensayos antes de combinar los productos.	
Instrucciones de Aplicación		
Incorporación al hormigón	Sika® ViscoCrete®-3425 se añadirá al agua de amasado o a la mezcla de hormigón durante el proceso de mezclado.	
Método de aplicación/Herramientas	Se deben seguir las reglas de buena práctica del hormigonado en cuanto a producción y colocación.  El hormigón debe curarse adecuadamente.	
Notas de aplicación/Limitaciones	<i>Hormigón autocompactante (HAC):</i> Para la realización de hormigones autocompactantes con Sika® ViscoCrete®-3425 se deben hacer diseños del hormigón específicos  <i>Heladas:</i> Si Sika® ViscoCrete®-3425 se helase, puede utilizarse sin que se vea disminuida ninguna de sus propiedades después de deshelerse lentamente a temperatura ambiente y agitado cuidadosamente.	
Notas	Todos los datos técnicos indicados en esta Hoja de Datos de Producto están basados en ensayos de laboratorio. Las medidas reales de estos datos pueden variar debido a circunstancias más allá de nuestro control.	
Instrucciones de Seguridad e Higiene	Para cualquier información referida a cuestiones de seguridad en el uso, manejo, almacenamiento y eliminación de residuos de productos químicos, los usuarios deben consultar la versión más reciente de la Hoja de Seguridad del producto, que contiene datos físicos, ecológicos, toxicológicos y demás cuestiones relacionadas con la seguridad.	
Notas Legales	Esta información y, en particular, las recomendaciones relativas a la aplicación y uso final del producto, están dadas de buena fe, basadas en el conocimiento actual y la experiencia de Sika de los productos cuando son correctamente almacenados, manejados y aplicados, en situaciones normales, dentro de su vida útil, de acuerdo a las recomendaciones de Sika. En la práctica, las posibles diferencias en los materiales, soportes y condiciones reales en el lugar de aplicación son tales, que no se puede deducir de la información del presente documento, ni de cualquier otra recomendación escrita, ni de consejo alguno ofrecido, ninguna garantía en términos de comercialización o idoneidad para propósitos particulares, ni obligación alguna fuera de cualquier relación legal que pudiera existir. El usuario de los productos debe realizar las pruebas para comprobar su idoneidad de acuerdo al uso que se le quiere dar. Sika se reserva el derecho de cambiar las propiedades de sus productos. Los derechos de propiedad de terceras partes deben ser respetados. Todos los pedidos se aceptan de acuerdo a los términos de nuestras vigentes Condiciones Generales de Venta y Suministro. Los usuarios deben de conocer y utilizar la versión última y actualizada de las Hojas de Datos de Productos local, copia de las cuales se mandarán a quién las solicite, o también se puede conseguir en la página «www.sika.es».	



## OFICINAS CENTRALES Y FABRICA

Madrid 28108 - Alcobendas  
 P. I. Alcobendas  
 Carretera de Fuencarral, 72  
 Tels.: 916 57 23 75  
 Fax: 916 62 19 38

## OFICINAS CENTRALES Y CENTRO LOGÍSTICO

Madrid 28108 - Alcobendas  
 P. I. Alcobendas  
 C/ Aragoneses, 17  
 Tels.: 916 57 23 75  
 Fax: 916 62 19 38



RESPONSIBLE CARE  
 El compromiso de Sika con el Desarrollo Sostenible